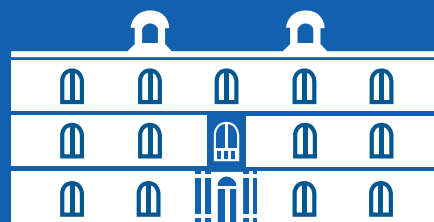




Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



**industriales**  
etsii UPCT

# IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA DE PROTOTIPADO RÁPIDO AUTOREPLICABLE

I.T.I. Electrónica Industrial  
Tecnología Electrónica

Carlos Alejandro Abellán de la Rosa (Autor)

Juan Antonio López Riquelme (Director)

Andrés Iborra García (Director)

*Cartagena, 9 de Octubre de 2013*



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES**  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL  
ESPECIALIDAD EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

**“IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA DE PROTOTIPADO RÁPIDO AUTOREPLICABLE”**

**DIRECTORES:** Dr. Ing. Juan A. López Riquelme  
Dr. Ing. Andrés Iborra García

**AUTOR:** Carlos Alejandro Abellán de la Rosa

*Cartagena, Octubre de 2013*



## AGRADECIMIENTOS

A Juan Antonio y a los “Andreses”, a mi familia, a mis padrinos y a ti: gracias. A mis abuelos, el que está y los que me faltan, porque un hombre debe serlo de los pies a la cabeza. A los miembros de la UPCT que me enseñaron que los ingenieros también somos personas, aunque un poco especialitos. A todas las personas que han influido durante este periodo de mi vida y a Radiohead, por “OK Computer”, el mejor álbum de la historia.



# ÍNDICE

	Pág.
Capítulo 1. Introducción	
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Desarrollo de la Memoria	3
Capítulo 2. Estado del Arte	
2.1 Introducción	5
2.2 Impresoras 3D y El Proyecto RepRap	5
2.2.1 Acabado, resolución y tolerancia de impresión	7
2.2.2 El Proyecto RepRap	8
2.2.3 MakerBot Industries	17
2.2.4 El Proyecto Clone Wars	19
2.3 Conclusiones	21
Capítulo 3. Prusa Mendel RepRap	
3.1 Introducción	23
3.2 Estructura del soporte:	23
3.2.1 Componentes	23
3.2.1.1 Componentes imprimibles	24
3.2.1.2 Componentes no imprimibles	26
3.2.2 Montaje	30
3.2.2.1 Capítulo 1: Preparación de varillas	30
3.2.2.2 Capítulo 2: Montaje eje Y	32
3.2.2.3 Capítulo 3: Montaje eje X-Z	36
3.3 Extrusor	40
3.3.1 Componentes	40
3.3.1.1 Componentes Imprimibles	40
3.3.1.2 Componentes no imprimibles	41
3.3.2 Montaje del extrusor	42
3.3.2.1 Montaje HotBed y finales de carrera	44
3.4 Electrónica	46
3.4.1 Posibilidades	46
3.4.2 Componentes Característicos	50
3.4.2.1 Conector USB	51
3.4.2.2 Botón de Reset	51
3.4.2.3 Drivers para los motores	51
3.4.2.4 Jumpers	53
3.4.2.5 MOSFET	53
3.4.2.6 Motores paso a paso	55
3.4.2.7 Fuente de alimentación	57

# ÍNDICE

	Pág.
3.4.3 Conexiones	57
3.4.3.1 Conexiones para la Ramps 1.4	58
3.4.3.2 Conexiones para la Sanguinololu 1.2	60
3.4.4 Montaje de la electrónica en la impresora y acabado del cableado	61
3.5 Precauciones: Posibles errores y soluciones	62
3.5.1 Conexiones de los motores y finales de carrera	62
3.5.2 Conexión de la fuente de alimentación	64
3.5.3 Conexión y regulación de los drivers	65
3.5.4 Conexión de los MOSFET y disipador	65
3.5.5 Vibración	67
3.5.6 Tensión de las correas dentadas	67
 Capítulo 4. Puesta a punto de la Impresora	
4.1 Introducción	69
4.2 Configuración software	69
4.2.1 Configuración firmware Marlin	69
4.2.2 Configuración software CURA	73
4.3 Calibración hardware	74
4.3.1 Calibración finales de carrera	75
4.3.2 Calibración heated-bed	75
4.4 Vida útil, piezas delicadas y consejos de uso	76
4.4.1 Vida útil	76
4.4.2 Piezas delicadas	76
4.4.3 Consejos de uso	77
4.5 Innovaciones implementadas	78
4.5.1 Cajetín electrónico	78
4.5.2 Heated Bed estabilizado	79
 Capítulo 5. Conclusiones y Trabajos futuros	
5.1 Conclusiones	81
5.2 Trabajos futuros	81
 Bibliografía	
Referencias	
Bibliografía básica	83
	83



# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tolerancia de impresión	8
Figura 2. Primer modelo de impresora 3D del Proyecto Reprap: Darwin	9
Figura 3. Impresora 3D modelo Cupcake, de MakerBot	10
Figura 4. Impresora 3D modelo Mendel, del Proyecto Reprap	11
Figura 5. Arbol genealógico de los modelos de impresoras del Proyecto Reprap	12
Figura 6. Impresora 3D modelo Prusa Mendel, del Proyecto Reprap	13
Figura 7. Impresora 3D modelo Prusa Mendel Iteración 2, del Proyecto Reprap	13
Figura 8. Impresora 3D modelo Printrbot, del Proyecto Reprap	14
Figura 9. Impresora 3D modelo Prusa Mendel it3	15
Figura 10. Impresora 3D modelo Thing-O-Matic, de MakerBot	17
Figura 11. Impresora 3D modelo Replicator, de MakerBot	18
Figura 12. Madre, primera impresora de Clone Wars, modelo Thing-O-Matic de MakerBot	19
Figura 13. Primer juego de piezas para clonar una Prusa Mendel Iteración 2	20
Figura 14. Circuito Integrado Ramps 1.4	47
Figura 15. Ramps 1.4 completamente ensamblada	48
Figura 16. Sanguinololu 1.3a sin componentes (parte de abajo)	49
Figura 17. Sanguinololu 1.3a completamente ensamblada	50
Figura 18. Pololu A4988	51
Figura 19. Conexión de Pololus en la Ramps 1.4	52
Figura 20. Jumpers	53
Figura 21. MOSFET canal N, STP55NF06L	55
Figura 22. Motor paso a paso, Nema 17, de Reprap World	57
Figura 23. Esquema de conexionado para Ramps 1.4	58
Figura 24. Esquema de conexionado para Sanguinololu 1.2	60
Figura 25. Tipo de montaje	61
Figura 26. Terminales del final de carrera utilizados	63
Figura 27. Conexión de los finales de carrera en la placa electrónica	63
Figura 28. Cables puenteados	64
Figura 29. Posicionamiento MOSFETs	66
Figura 30. Disipador del mosfet conectado a la clema de alimentación para la heated bed	66
Figura 31. Preferencias CURA	73
Figura 32. Configuración CURA	73
Figura 33. Pestana Jog	74
Figura 34. Cajetín electrónico y disipadores	78
Figura 35. Montaje estabilizador	79

# ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Componentes extrusor	24
Tabla 2. Componentes imprimibles	25
Tabla 3. Componentes alternativos	26
Tabla 4. Componentes no imprimibles	27
Tabla 5. Varillas roscadas necesarias	30
Tabla 6. Varillas lisas necesarias	31
Tabla 7. Varilla extrusor	32
Tabla 8. Componentes imprimibles extrusor	40

# ÍNDICE DE LISTADOS

	Pág.
Listado 1. Velocidad de comunicación	69
Listado 2. Tipo de placa	70
Listado 3. Tipo de termistor	70
Listado 4. Polaridad finales de carrera	71
Listado 5. Sentido de giro	72
Listado 6. Paso por vuelta	72



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Introducción

Actualmente, existen muchas iniciativas y ayudas económicas, provenientes de distintos organismos públicos y privados, que promueven el emprendimiento, con objeto de que los beneficiarios puedan formar nuevas empresas de tipo Spin-Off, Start-Up, etc.

Por otro lado, en muchos de los casos las nuevas empresas requieren de realizar un diseño electrónico, así como el diseño de una carcasa para ofertar un nuevo producto en el mercado. La fabricación de los diferentes prototipos de carcasa hasta llegar al modelo definitivo requiere de una considerable inversión. Por ello, resulta de vital interés disponer de una máquina de prototipado rápido y que sea de bajo coste. De este modo, las empresas recién constituidas y con bajo capital social, pueden ser más competitivas al poder proporcionar al mercado productos prácticamente finales.

El proyecto RepRap es una iniciativa creada con el propósito de crear una máquina de prototipado rápido libre, que sea además capaz de replicarse a sí misma. Una máquina de este tipo puede fabricar objetos físicos a partir de modelos generados por ordenador. De la misma manera que la impresora de un ordenador permite imprimir imágenes en dos dimensiones en papel, RepRap imprime objetos en 3D a base de plástico, permitiendo la fabricación de objetos. Incluso RepRap puede generar las partes necesarias para construir otra máquina igual a ella. El proyecto RepRap comenzó en febrero del 2004 por Andrian Bowyer en Inglaterra, pero actualmente hay personas colaborando en otras partes del mundo.

Tal y como se ha comentado anteriormente, un objetivo principal del proyecto RepRap es la autorreplicación, que es la habilidad de producir los componentes necesarios para construir otra versión de sí mismo. Esto permite reparar, mejorar e, incluso, evolucionar la máquina original, así como producir las piezas necesarias para crear un clon u otra impresora.

El objetivo del presente Proyecto Fin de Carrera es el desarrollo e implementación de una impresora 3D autorreplicante modelo Prusa Mendel iteración 3, perteneciente al proyecto RepRap, para la ejecución y creación de prototipos y matrices diseñados con anterioridad en software CAD, tales como 3D Studio Max, Blender, Proteus, o cualquier otro capaz de exportar en formato .stl, .obj o .dae.

La motivación nace de la necesidad actual por luchar contra la obsolescencia programada, proporcionando a la Universidad Politécnica de Cartagena, así como a sus alumnos, una herramienta básica e innovadora para la producción de piezas baratas y resistentes de PLA o ABS.

El proyecto se centrará en la construcción, instalación y calibración de dicha tecnología, familiarizando al lector en el mundo de la impresión 3D y proporcionando los datos necesarios para la creación de una máquina capaz de crear piezas de mayores dimensiones siguiendo esquemas paramétricos. Concretamente, en este proyecto se encontrarán las instrucciones visuales que permitirán ensamblar la impresora, así como un apartado con los problemas más frecuentes que se pueden encontrar durante la implementación de este tipo de equipo y algunas soluciones alternativas a las habituales que mejoran la eficiencia y la fiabilidad de la Prusa Mendel propuestas y desarrolladas por el autor de este proyecto.

## 1.2 Objetivos

Como se ha comentado en la sección anterior, el objetivo principal del presente Proyecto Fin de Carrera es el desarrollo e implementación de una impresora 3D autoreplicable modelo Prusa Mendel iteración 3, perteneciente al proyecto RepRap, para la ejecución y creación de prototipos y matrices diseñados con anterioridad en software CAD. Para conseguir este objetivo es necesario llevar a cabo el conjunto de sub-objetivos que se detallan a continuación:

- ➡ Buscar y seleccionar los materiales necesarios para la implementación de la impresora 3D.
- ➡ Realizar un estudio, tanto a nivel hardware como software, de los elementos seleccionados.
- ➡ Llevar a cabo el montaje de la máquina de prototipado rápido.
- ➡ Realizar todas las tareas necesarias de calibración y configuración.



- Realización de mejoras software y hardware que mejoren el funcionamiento de la máquina de prototipado autorreplicante.

## 1.3 Desarrollo de la Memoria

### 1. Introducción

Se presenta la motivación de este trabajo, además de enumerar los objetivos del mismo y describir la memoria presentada.

### 2. Estado del Arte

Se desarrolla un estado de la técnica de máquinas de prototipado rápido autorreplicantes, principalmente las del proyecto RepRap, además de analizar características de las mismas tales como su acabado, precisión, entre otras.

### 3. Prusa Mendel RepRap

Guía de montaje paso a paso, además de un listado de todos los componentes, imprimibles y no imprimibles, que componen la impresora 3D. También se analizan y comparan las opciones a la hora de introducir la electrónica necesaria y se incluye un apartado sobre posibles errores y soluciones que se pueden encontrar durante la fabricación de una de estas máquinas.

Se informan detalles de la vida útil, las piezas más débiles y algunos consejos que pueden ser de gran importancia así como de las modificaciones y mejoras realizadas más llamativas e innovadoras.

## 4. Calibración y Configuración

Se muestra cómo configurar el firmware de la placa Arduino y el software CURA así como a calibrar los finales de carrera y la orientación de la heated-bed.

## 5. Conclusiones

Se juzgan los resultados obtenidos respecto a los propuestos en un principio, analizando si se cumple la motivación y los objetivos a lo largo del proyecto.

# CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

## 2.1 Introducción

En este capítulo se desarrolla un estado de la técnica de máquinas de prototipado rápido autoreplicantes, analizando su evolución desde su nacimiento hasta la actualidad y algunas de sus características más significativas.

Por detallar, se hablará de las comunidades más importantes dedicadas a la transmisión de información, como RepRap o Clone Wars, de las diferentes tecnologías de impresión y de algunos de los modelos comerciales más usuales del mercado.

## 2.2 Impresoras 3D y El Proyecto RepRap

Las impresoras 3D nacen de la idea de convertir en objetos reales diseños realizados con un programa CAD en un ordenador. Se utilizan a día de hoy para la creación de prototipos y la matricería o prefabricación de piezas en sectores como la arquitectura o el diseño industrial. Son además muy apropiadas en la creación de prótesis médicas, pues permiten adaptarlas a las características particulares de cada paciente con facilidad.

Existen en la actualidad varios tipos de impresoras 3D. Por un lado están las de compactación de una masa de polvo por estratos, donde se pueden encontrar impresoras 3D de tinta que funcionan de manera que inyectan tinta aglomerante al polvo para compactarlo, es positivo el hecho de que al usar tinta se pueden mezclar colores; y, tenemos también impresoras 3D láseres, que polimerizan el polvo mediante una transmisión de energía. Posteriormente, al acabar la impresión, se introduce la pieza en líquido para solidificarse. La ventaja de las impresoras 3D de tinta es que su proceso es más rápido y económico que el de las impresoras 3D láseres, y su desventaja, también frente a las impresoras 3D láseres, es que las piezas que obtenemos son más frágiles.

Por otro lado existen impresoras 3D que se basan en la inyección de polímeros. Se basan en la inyección de resinas líquidas que son tratadas con luz ultravioleta; son los llamados fotopolímeros. Su ventaja frente a las de polvo es que no requieren un tiempo de espera



al finalizar la impresión para empezar a manipular las piezas; además se caracterizan por su gran precisión y buen acabado superficial, haciéndolas idóneas, por ejemplo, para imprimir diseños de matricería. Cabe destacar también, que han sido las primeras impresoras en ser capaces de mezclar dos materiales distintos en una sola impresión. Su único inconveniente es que al acabar la impresión hay que retirar unos soportes usados para la misma mediante un chorro de agua a presión.

Por último analizamos los tipos de impresora 3D, como el del modelo que se desarrolla en este proyecto, y en general todos los modelos del Proyecto RepRap basadas en la extrusión en caliente de un filamento de plástico. Se basan en empujar un hilo de plástico a través de un dispositivo, denominado extrusor, que se calienta hasta una temperatura capaz de fundir ligeramente el material de plástico utilizado, ABS (220/230 °C) o PLA (170/180°C), sin llegar a derretirlo por completo. De esta manera, al llegar a la punta del dispositivo, que es mucho más fina que el filamento original, va expulsando por ésta un fino hilo de plástico y lo va depositando en una base. Esta base debe estar caliente para que el hilo extruido se vaya quedando pegado y así la máquina pueda ir creando la pieza capa a capa. Si la base no estuviera lo suficientemente caliente para que el hilo se pegase bien (110/120 °C para ABS, 60/70 °C para PLA), a la vez que la máquina va ascendiendo construyendo las capas superiores, iría arrastrando las capas ya impresas desfigurando por completo la pieza en construcción.

Algunas impresoras de este último tipo, como el último modelo de MakerBot, incluyen dos extrusores, uno de ellos va creando la pieza como se ha descrito, mientras que el otro rellena huecos que deben quedar vacíos con un material soluble en agua, de manera que al acabar la impresión, se sumerge la pieza en agua y los huecos que debían quedar libres quedan perfectos. Esto hace que la impresión sea más sencilla y precisa para la máquina pues no tendrá que hacer tramos en el aire, llegando incluso a hacer posible la creación de diseños que, por este motivo de tener que imprimir en el aire, con los modelos anteriores no era posible imprimir.

Un pequeño esquema de tecnologías de impresión sería el siguiente:

A) Compactación: La masa de polvo se compacta por estratos.

- A.1) De tinta: Utiliza tinta aglomerante para compactar el polvo y permite la impresión en diferentes colores. El polvo puede ser a base de escayola o celulosa. El resultado es frágil aunque una vez sometida la pieza a una infiltración a base de cianocrilato o epoxis se obtiene la dureza necesaria. Además, utilizando polvo de celulosa pueden ser infiltradas con elastómeros, consiguiendo piezas flexibles. Este método es rápido y económico, aunque las piezas son más frágiles.
- A.2) Láser: Un láser transfiere energía al polvo haciendo que se polimerice. Después se sumerge en un líquido que solidifica las zonas polimerizadas. Las piezas obtenidas son más resistentes, aunque el proceso es más lento y costoso.



B) Adición: El objeto es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material. Las principales diferencias entre las tecnologías de adición es la forma en que las capas son usadas. Algunos métodos usan fundido o ablandamiento del material para producir capas, como el sintetizado de láser selectivo (SLS) y modelado por deposición fundida (FDM) mientras que otros depositan materiales líquidos que son curados mediante diferentes tecnologías. La elección del método depende de las prioridades, velocidad, coste del prototipo, coste de la impresora, materiales e, incluso, color. A continuación se describirán los métodos actuales, así como las tecnologías que utilizan y los materiales con los que pueden trabajar, no siendo necesario profundizar más en estos procesos de fabricación y siendo su mención no más que un objetivo informativo.

- B.1) Extrusión: Utiliza la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM) y puede usar materiales termoplásticos (PLA, ABS), HDPE, metales eutécticos o materiales comestibles. Éste será el método elegido para este Proyecto Fin de Carrera (PFC).
- B.2) Hilado: Mediante fabricación por haz de electrones (EBF3), puede usar casi cualquier aleación.
- B.3) Granulado: Este método acepta varias tecnologías:
  - B.3.1) Sinterizado directo de metal por láser (DMLS), al igual que el método de hilado, puede utilizar casi cualquier aleación.
  - B.3.2) Fusión por haz de electrones (EBM), aleaciones de titanio.
  - B.3.3) Sinterizado selectivo por calor (SHS), polvo termoplástico.
  - B.3.4) Sinterizado selectivo por láser (SLS), termoplásticos, polvos metálicos y cerámicos.
  - B.3.5) Proyección aglutinante (DSPC), yeso.
- B.4) Laminado: Laminado de capas (LOM), útil con papel, papel de aluminio y capas de plástico.
- B.5) Fotoquímicos: Inyectan fotopolímeros que son curados con luz ultravioleta. El acabado y la precisión son de gran calidad, siendo perfectas para su uso como matrices.
  - B.5.1) Estereolitografía (SLA)
  - B.5.2) Curación por suelo sólido (SGC)

### 2.2.1 Acabado, resolución y tolerancia de impresión

A diferencia de la estereolitografía, la impresión 3D por inyección está optimizada para obtener velocidad, bajo coste y facilidad de uso, lo cual hace de ella una técnica válida en etapas tempranas de diseño en ingeniería. No son necesarios materiales químicos tóxicos y el trabajo requerido para el acabado post-impresión es mínimo; soplado del polvo sobrante o retirada del material dependiendo de la técnica.

La resolución de una impresora 3D dependerá del espesor de capa en el caso del eje Z y de los puntos por pulgada en el plano X-Y. El espesor típico de capa es del orden de 0,1mm, en el caso del extrusor utilizado en este PFC, el espesor es de 0,35mm, y en las máquinas profesionales llegan a capas de hasta 16 micras. La resolución X-Y es comparable a las impresoras láser convencionales, entre 50 y 100 micras de diámetro.

La tolerancia, en el caso de dispositivos DIY de bajo coste, está entre 0'1 y 0'2 mm, dependiendo en gran medida de los materiales utilizados, los controladores de los motores paso a paso usados y de la calidad de la calibración que se haya conseguido. Puede verse una demostración de precisión en la Figura 1, el calibre marca 20 mm exactos.



### 2.2.2 El Proyecto RepRap

El Proyecto RepRap nace en el año 2.005 gracias a la idea del ingeniero Adrian Bowyer de la Universidad de Bath, en el Reino Unido. El nombre RepRap proviene de "*Replicating Rapid prototyper*" y su filosofía desde el inicio estuvo basada en diseños y desarrollos Open Source, motivados por su idea de que la industria nunca desarrollará una máquina auto-replicable porque no le saldría rentable. El logotipo es un cilindro con forma de gota con pendientes sobresalientes de 45° (la máxima pendiente imprimible), siendo ésta la forma más fácil de imprimir un hueco cilíndrico horizontal de una pieza.



Todos los componentes se encuentran bajo la licencia GNU GPL. Esta licencia permite la copia, el estudio, la distribución y la mejora de los diseños así como del código fuente. Utiliza hardware libre Arduino como cerebro principal y todos los esquemas pueden ser descargados gratuitamente.

Al cabo de tres años consiguieron desarrollar el primer modelo de impresora 3D del Proyecto RepRap, y así, en Febrero del año 2.008, crearon la primera impresora 3D, el modelo conocido como Darwin; nombre inspirado del creador de La Teoría de la Evolución, Charles Darwin, pues tenían la idea de crear una sucesión de modelos que evolucionen más rápido que las especies de seres vivos. A su vez, esta impresora consiguió crear su primera réplica en Mayo de ese mismo año.

El modelo Darwin, cuyos componentes del Proyecto RepRap terminaron en el año 2.008, es una impresora como la que se muestra en la imagen de la Figura 2.

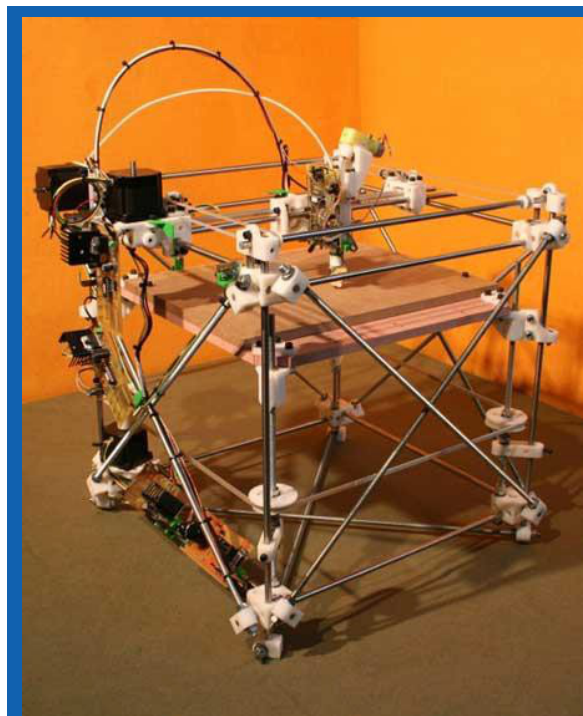


Figura 2. Primer modelo de impresora 3D del Proyecto RepRap: Darwin

El grupo de ingenieros del Proyecto RepRap creció mucho en poco tiempo y se creó la RepRap Foundation (Fundación RepRap), desde donde se venden piezas impresas.

Uno de los impulsores de esta fundación fue el ingeniero Zach Smith, que por otro lado fue uno de los creadores de Makerbot.

Gracias a RepRap Foundation se comenzaron a impartir talleres por todo el mundo. El propio Zach Smith dirigió el taller que se celebró en Febrero de 2.009 en el Medialab Prado de Madrid, en el cual se construyó una Darwin.

Zach Smith aprovechó para dar a conocer la noticia de que habían creado MakerBot Industries, web dónde cualquiera podría comprar el material necesario para construirse un modelo de impresora que habían desarrollado en MakerBot. En concreto, la denominada Cupcake costaba en total, incluyendo gastos de envío, alrededor de 715 €.

Juan González Gómez, conocido en la comunidad como “Obijuan”, encargó la Cupcake (que suponía además la MakerBot número 8), mientras asistía al taller de Medialab. Los asistentes comentaban que aunque fue increíble poder contar con su propia impresora 3D, era complicado montarla pues requería soldadura, todo el ensamblado y ponerla en marcha; además de que también fue complicado imprimir debido a los muchos fallos que aún daba.

En la imagen de la Figura 3 podemos ver el modelo Cupcake de MakerBot, citado anteriormente.

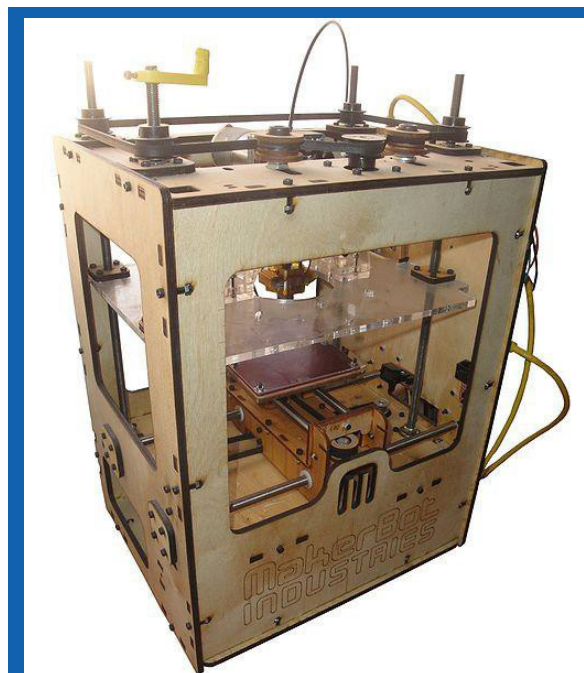


Figura 3. Impresora 3D modelo Cupcake, de MakerBot





Sin embargo, esta Cupcake, a la que Juan González bautizó con el nombre R1, le sirvió para imprimir las piezas con las que se construyó, dos años y medio después, su propia Prusa Mendel, a la que bautizó como R2; e incluso con R2 tardó solo unos meses en imprimirse las piezas necesarias para construirse su tercera impresora 3D, una Prusa Mendel iteración 2 a la que denominó R3. Juan González tiene suma importancia en este mundo debido a que es el creador del grupo Clone Wars del que posteriormente se hablará en este PFC.

Continuando con la historia del Proyecto RepRap, cabe destacar también que Zach Smith, que recordemos que era uno de los impulsores de RepRap Foundation, creó la web Thingiverse [1]. Creó esta web como un repositorio para subir sus diseños en 3D imprimibles y que los usuarios de impresoras 3D pudieran descargarlos. Hoy en día, son muchos los usuarios, que suben sus propios diseños para intercambiarlos con otros usuarios; pero además se utiliza la web para valorar los diseños de los demás, compartir información acerca del ensamblado de los diseños que se suben, etc.

El siguiente hecho importante del Proyecto RepRap se dio en Octubre del año 2.009, cuando terminaron el diseño del modelo Mendel (ver Figura 4). Este nuevo modelo supuso el mayor avance para RepRap, pues suponía haber conseguido una impresora 3D aún más compacta y fácil de montar y replicar que las que ya existían.

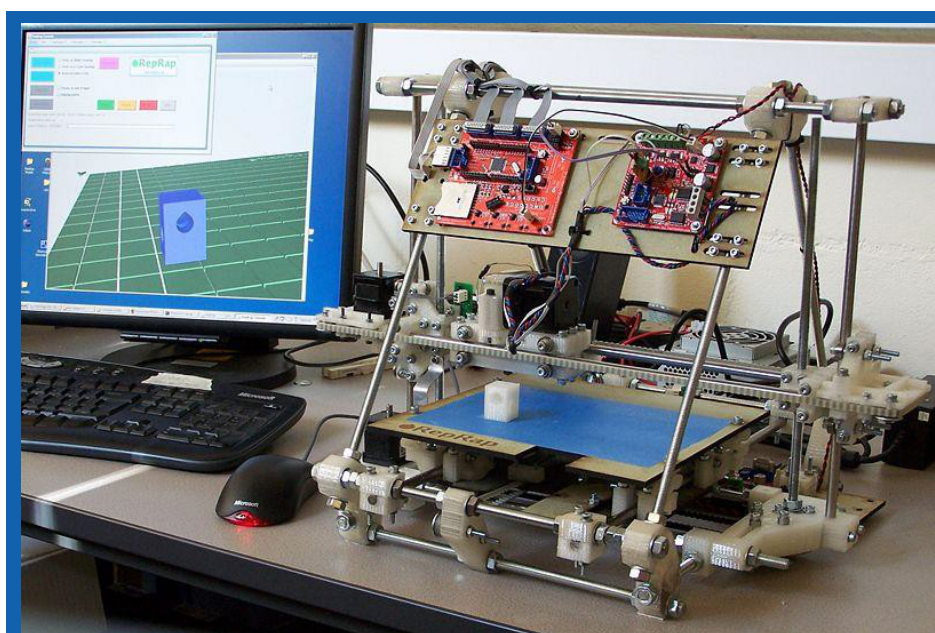


Figura 4. Impresora 3D modelo Mendel, del Proyecto RepRap

Pero el modelo Mendel no se quedó sólo en eso, de él comenzaron a surgir modelos derivados, como se puede observar en lo que se puede llamar el “árbol genealógico” del Proyecto RepRap, que se muestra en la Figura 5.

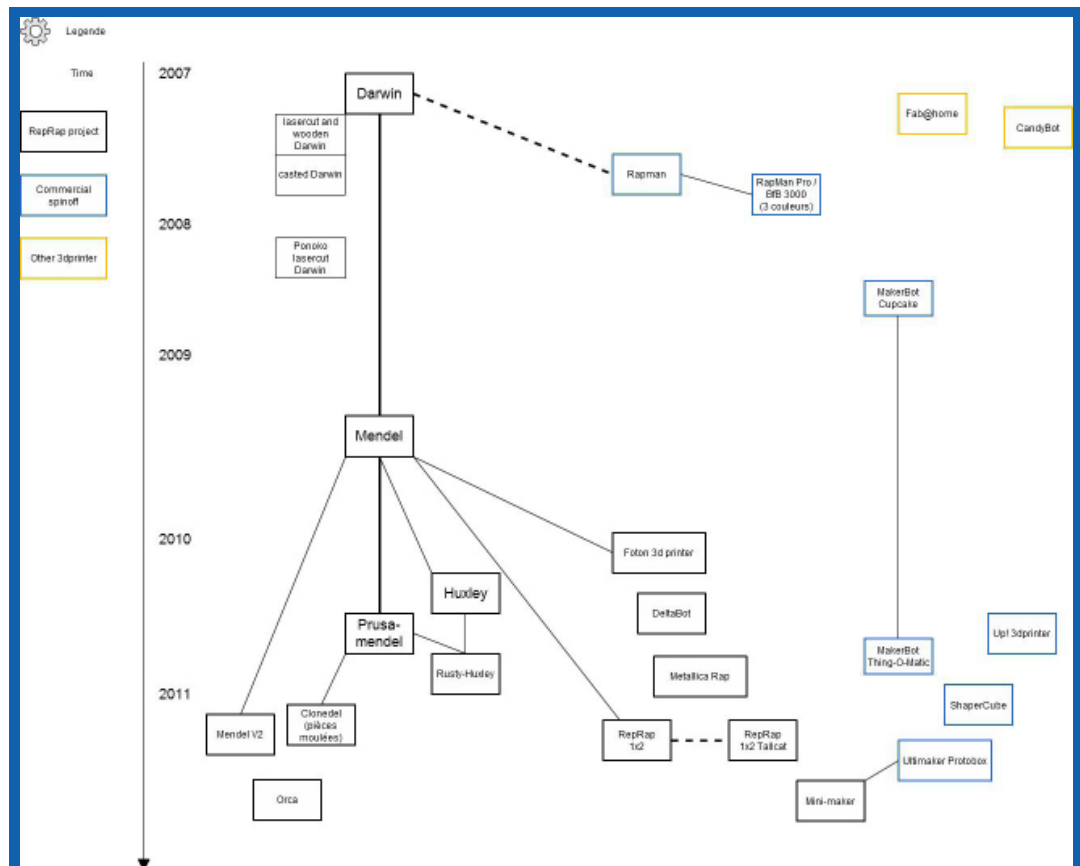


Figura 5. Árbol genealógico de los modelos de impresoras del Proyecto RepRap

Este árbol genealógico de la Figura 5, muestra, no sólo los modelos de impresoras 3D del Proyecto RepRap (los bordeados en negro según la leyenda de la Figura), sino también los modelos comerciales (bordeados en azul) y los calificados como “Otras impresoras 3D” (bordeados en amarillo).

El principal modelo derivado del Mendel se puede decir que fue el Prusa Mendel. Este modelo fue desarrollado por el ingeniero alemán Josef Prusa, y terminado en Agosto del año 2.010.



La Prusa Mendel supuso otro paso de gigante para el Proyecto RepRap, pues era aún más simple que la Mendel, está muy bien documentada y enseguida se hizo popular. La Prusa Mendel es el modelo tratado en este PFC y el modelo mejor valorado hasta la fecha del Proyecto RepRap.

En Noviembre del año 2.011, en menos de un año y medio desde que saliera el modelo Prusa Mendel, se impartió un taller en Colonia (Alemania) dónde se expuso la iteración 2 del modelo. Esta segunda versión incorporaba mejoras como el uso de rodamientos lineales y el rediseño de algunas piezas estructurales, entre otros. A pesar de ello, en realidad no suponía una gran innovación respecto al modelo Prusa Mendel original.

En la imagen de la Figura 6 se puede ver el modelo Prusa Mendel original, el de Agosto del año 2.010, y en la de la Figura 7 se muestra la segunda versión del modelo Prusa Mendel, el de Noviembre de 2.011. Los cambios son difíciles de apreciar a simple vista.

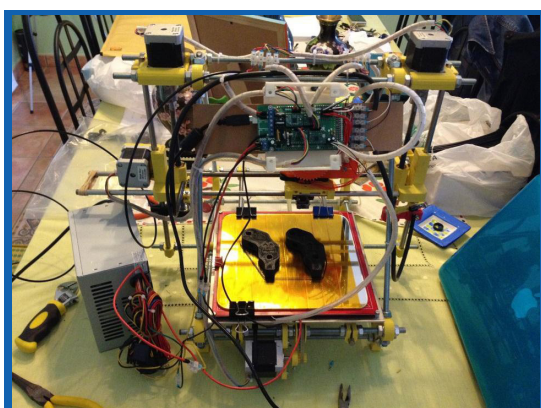


Figura 6. Impresora 3D modelo Prusa Mendel, del Proyecto RepRap

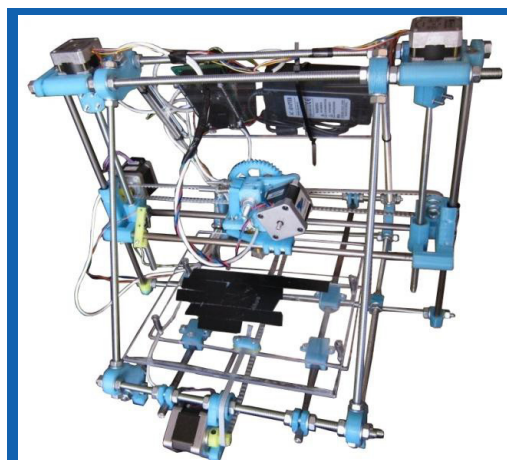


Figura 7. Impresora 3D modelo Prusa Mendel Iteración 2, del Proyecto RepRap



Por otro lado, el ingeniero estadounidense Brook Drumm concluyó en Diciembre de 2.011 un nuevo modelo de impresora 3D denominado Printrbot (ver Figura 8), que está llamado a ser la revolución de las impresoras 3D. Este modelo es aún más simple y fácil de montar que el modelo Prusa Mendel. Además, es expandible a lo largo de los tres ejes de movimiento, lo que significa que el tamaño de la impresora será personalizable por parte del usuario. El problema que tuvo es que sólo estaba diseñada para métrica americana, por lo que era complicado construirla para los usuarios europeos; pero ya hay varios ingenieros, miembros del proyecto Clone Wars, que están rediseñando las piezas para adaptarla a la métrica europea, por lo que pronto será plenamente asequible implementar una Printrbot en Europa.

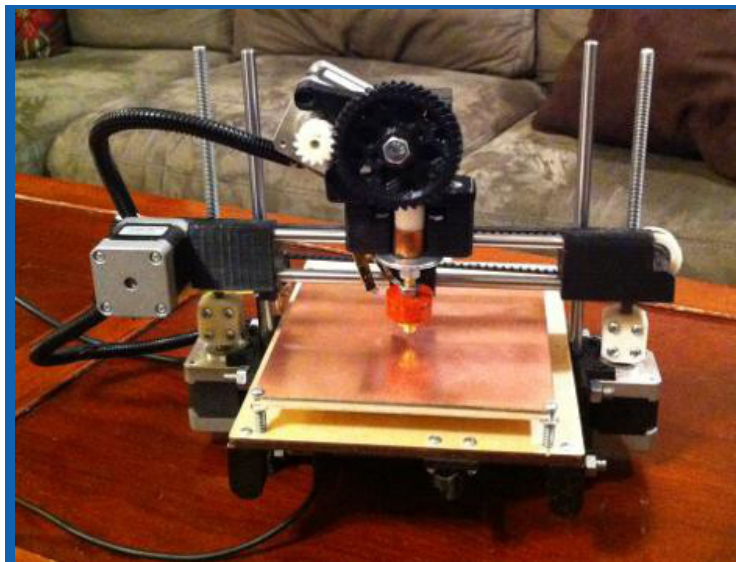


Figura 8. Impresora 3D modelo Printrbot, del Proyecto RepRap

El diseño de la Printrbot fue propuesto en Noviembre de 2.011, con la siguiente meta propuesta: “Una impresora en cada casa y en cada colegio”. Para realizarla se solicitó una financiación de 25.000 dólares, y se recibieron 830.000 dólares; 1.808 personas aportaron dinero voluntariamente.

Brook, el creador del modelo, ha iniciado una empresa a través de la web de Printrbot [2], en la que vende impresoras de su propio modelo y/o piezas y componentes para las mismas.

Actualmente, la última creación de Josef Prusa ha sido una impresora paramétrica, lo cual significa que puede ser adaptada para conseguir cualquier configuración de volumen deseado. Ésta impresora es la Prusa Mendel iteración 3, y es en la que se centra este PFC.



El modelo Prusa Mendel iteración 3 es una mezcla entre la Mendel original y la Prusa Mendel Iteración 2 y la Printrbot, cual se puede observar en la Figura 9 acabado con marco de aluminio.

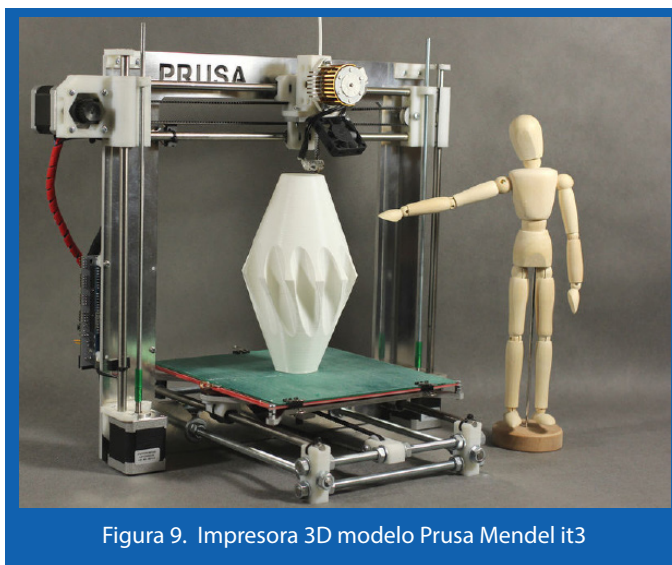


Figura 9. Impresora 3D modelo Prusa Mendel it3

Para concluir con la historia del Proyecto RepRap, cabe destacar que tiene su propia página web en [3]. Esta web fue creada el 1 de Octubre del año 2.008 y hoy en día está adaptada a varios idiomas. En la página inicial de la web, en castellano, hablan de en qué consiste el Proyecto RepRap y, como ya se ha comentado en este proyecto, hablan de que la motivación fue la creación de máquinas capaces de crear objetos, llegando incluso a replicarse a sí mismas. Comentan que aunque todavía se necesita la ayuda de un ser humano, el objetivo es llegar a un modelo capaz de auto-replicarse por completo de manera autónoma.

Por otro lado, hablan de que al estar basado en la filosofía Open Source, el proyecto permite que todo avance muy rápido. Incluso lo comparan, como ya se ha dicho, con la Teoría de la Evolución de Charles Darwin, y llegan a decir que la filosofía Open Source permite que los modelos evolucionen más rápidamente que las especies de los seres vivos.

Por último, hacen referencia al objetivo final de todo el Proyecto, que es conseguir que haya impresoras 3D en cada casa, en cada centro educativo y, lo que se comparte como objetivo de las impresoras 3D en general, en cada fábrica. Este último hecho, que haya una impresora 3D en cada fábrica, dicen, crearía una revolución económica y social; pues, por un lado, se reducirían el número de fábricas, la necesidad de transportar bienes y así las necesidades de dinero y, por otro lado, aumentarían la autonomía de las industrias, los desarrollos tecnológicos, etc.

A continuación, un pequeño listado comparativo entre las principales características de algunas de las impresoras del proyecto RepRap más representativas:

Darwin (RepRap 1.0):

- Volumen de trabajo aproximado: 230 x 230 x 100
- Materiales de trabajo: PCL (policaprolactona), usado por su bajo punto de fusión (60°)
- Dimensiones exteriores: 600 x 520 x 650
- Peso: Alrededor de 14kg

Mendel (RepRap 2.0):

- Volumen de trabajo aproximado: 200 x 200 x 150
- Materiales de trabajo: PLA, HDPE (polietileno de alta densidad), ABS y más.
- Dimensiones exteriores: 500 x 400 x 360
- Peso: 7kg
- Velocidad de impresión: 15.0 cm<sup>3</sup>/hora

RepRap 3.0 "Huxley" (mini Mendel):

- Volumen de trabajo aproximado: 140 x 140 x 110
- Materiales de trabajo: PLA, ABS, termoplásticos de 1.75mm de diámetro
- Dimensiones exteriores: 260 x 260 x 280
- Velocidad de impresión: 33.0 cm<sup>3</sup>/hora

Prusa Mendel (Prusa i1)

- Volumen de trabajo aproximado: 200 x 200 x 100.
- Materiales de trabajo: PLA, HDPE, ABS y más.

Prusa Mendel (Prusa i2)

- Volumen de trabajo aproximado: 180 x 180 x 130
- Dimensiones exteriores: 440 x 470 x 370

Prusa Mendel (Prusa i3)

- Volumen de trabajo aproximado: 200 x 200 x 200.
- Dimensiones exteriores: 340 x 440 x 370
- Materiales de trabajo: PLA, HDPE, ABS y más.



### 2.2.3 MakerBot Industries

Al hablar en el Proyecto RepRap de la Figura de Zach Smith hay que hablar también de la empresa MakerBot Industries.

Fue creada en Marzo de 2.009 por los ingenieros estadounidenses Zach Smith, Bre Pettis y Adam Mayer. En Julio de ese mismo año se mudaron a su local actual. Su primer producto fue el, ya comentado, modelo Cupcake y que se puede observar en la imagen de la Figura 2.

Su fama comenzó a crecer y recibieron ayuda de la comunidad. En el año 2.011, pese a haber liberado todos los diseños del modelo Cupcake, recibieron una inversión de 10 millones de dólares que sirvieron para continuar investigando en la mejora y evolución de este proyecto.

Evolucionaron su modelo Cupcake al modelo Thing-O-Matic, que es el que se puede apreciar en la Figura 10.



Figura 10. Impresora 3D modelo Thing-O-Matic, de MakerBot

Sin embargo, las impresoras de MakerBot, además de tener el inconveniente importante de su alto precio y de que pierden la esencia de la filosofía Open Source, tienen la desventaja de que su plataforma de impresión (de 10 x 10 cm) es un cuarto de la que tienen modelos como la Prusa Mendel original o su segunda versión (de 20 x 20 cm).

Finalmente, su último modelo, Replicator (ver Figura 11), si ha supuesto un avance muy importante al introducir un segundo extrusor. Este segundo extrusor, en lugar de extruir plástico ABS o PLA, como el otro extrusor o los extrusores de los otros modelos de impresoras de RepRap o de MakerBot, extruye un material soluble en agua que se utiliza para recubrir huecos que se deben dejar libres en las piezas, de manera que se pueden imprimir modelos que antes era imposible hacerlo, así como facilitamos la impresión de modelos en los que la impresora tuviera que imprimir partes del mismo en el aire. Además, aunque no ha llegado al tamaño de la base de impresión de las Prusa Mendel, ha superado el de los anteriores modelos de MakerBot teniendo una base de 10 x 20 cm.

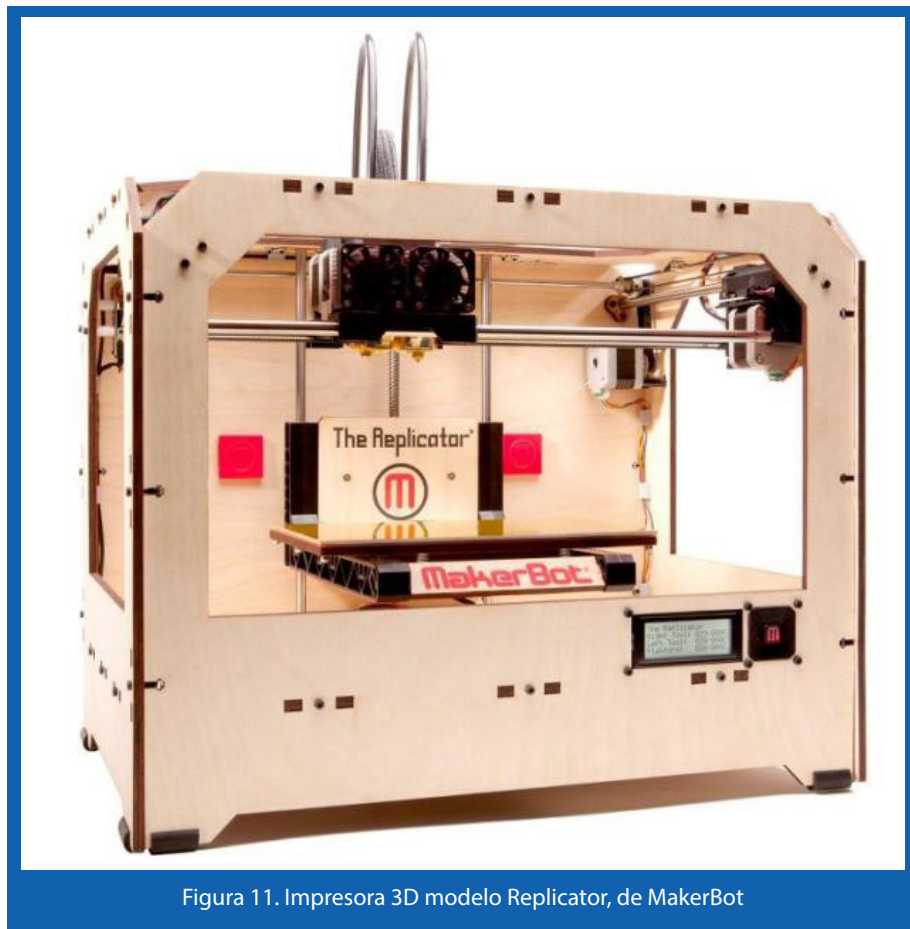


Figura 11. Impresora 3D modelo Replicator, de MakerBot



### 2.2.4 El Proyecto Clone Wars

Es importante comentar el primer proyecto español de impresoras 3D, el Proyecto Clone Wars.

El Proyecto Clone Wars fue creado por el ingeniero, Doctor en Robótica, Juan González Gómez, del que ya hemos hecho mención como Obijuan, en Abril de 2.011. Su página web, creada como una parte de la web de la Asociación de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M), es [4].

Inicialmente comenzó con una impresora 3D modelo Thing-O-Matic a la que la Asociación de Robotica de la UC3M bautizó con el nombre simbólico de Madre (hace referencia a las réplicas de impresoras que a partir de ella se han hecho y se siguen haciendo).

El día 15 de Abril de 2.011 se celebró la primera reunión del Proyecto Clone Wars para exponer los fines del proyecto y para hablar sobre la impresora, Madre, que pronto llegaría y que habría que ensamblar y calibrar.

Madre (ver Figura 12) fue recibida por la Asociación de Robótica de la UC3M el 13 de Mayo de 2.011, tras todo el montaje, calibrado, etc., imprimió su primera pieza el 17 de Mayo de 2.011.

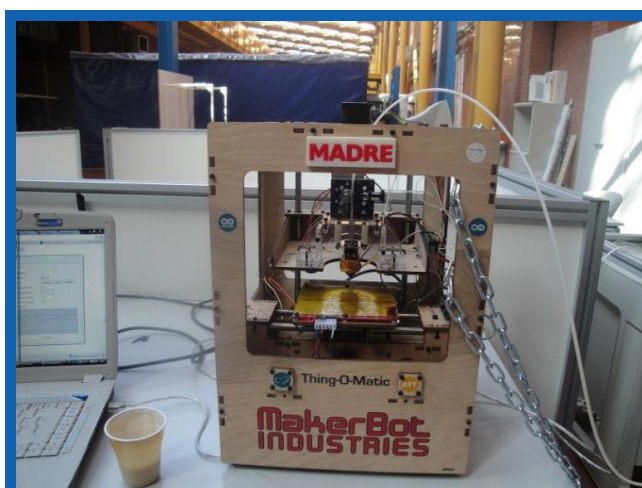


Figura 12. Madre, primera impresora de Clone Wars, modelo Thing-O-Matic de MakerBot

Actualmente no hay integrantes en el proyecto Clone Wars sólo de España, sino de todas partes del mundo (Suramérica, Estados Unidos, Suecia, etc).



El primer “clon” de Madre llegó en Septiembre de 2.011, Mardan, la impresora 3D Prusa Mendel, y en la que se basa este proyecto. Unos meses más tarde, el 11 de Noviembre de 2.011, Maese Artorius, otra Prusa Mendel, estaba también completamente ensamblada; era la segunda réplica que se hacía a partir de Madre. Y, el 11 de Diciembre del mismo año, R2, Prusa Mendel de Juan González Gómez, creada a partir de su Cupcake (R1), llegaba también al final de su montaje. Poco a poco, se fueron acabando más clones, pero, sin embargo, ninguno había conseguido aún imprimir ninguna pieza.

Fue el 24 de Diciembre de 2.011 cuando, al fin, Juan conseguía imprimir su primera pieza con su impresora R2. El día 31 de Diciembre del mismo año, R2 estaba plenamente calibrada y Juan comenzaba a imprimir piezas para su tercera impresora, R3, y también para donárselas a otros integrantes del Proyecto Clone Wars, para clonar más impresoras y más rápido; pues Madre estaba saturada.

Con la llegada del año 2.012 el Proyecto crecía cada vez más y más rápido. El día 18 de Enero, R2 imprimía por completo el primer juego de Prusa Mendel (Figura 13), que además era ya de la iteración 2 del modelo, y Juan lo utilizaría para construirse su tercera impresora 3D, una Prusa Mendel Iteración 2 a la que llamaría R3.



Figura 13. Primer juego de piezas para clonar una Prusa Mendel Iteración 2

El grupo seguía creciendo y cada vez eran más los clones que iban acabando su ensamblado. Juan llegó a donar hasta diez juegos de piezas, impresas íntegramente por R2, a otros miembros de Clone Wars, que les servían a estos para hacerse sus propias Prusa Mendel Iteración 2, teniendo, a cambio de esta donación, que donar



ellos también un juego de piezas a otro miembro, cuando acabasen el ensamblado y calibración de su impresora.

Con el paso del tiempo algún miembro más del Proyecto Clone Wars donó también algún juego de piezas procedentes de sus clones, y el último hito importante es que el clon R3 imprimió su primera pieza el 1 de Abril de 2.012.

A día de hoy son tantos los miembros que se hizo un árbol genealógico de los clones del Proyecto Clone Wars. Dicho esquema se muestra en la web [5].

## 2.3 Conclusiones

La elección de un modelo dentro del proyecto RepRap se basa, principalmente, en la posición jerárquica que ocupa esta en el árbol genealógico sabiendo que cuanto más haya evolucionado mejores características y acabados conseguirá, además de que, probablemente, haya solucionado errores de ensamblado.

En este PFC se busca un modelo OpenSource, de manera que los modelos comerciales como Makerbot quedan automáticamente descartados pese a conseguir impresiones de mejor calidad (no compensadas con el alto coste de estas máquinas).

Actualmente, el modelo de impresora más abierto a modificaciones es, al mismo tiempo, el último en haber sido desarrollado: Prusa Mendel iteración 3. Esta máquina proporciona excelentes niveles de calidad en relación al coste total, sus características le otorgan una buena superficie y velocidad de impresión y será el punto central de este PFC.





# CAPÍTULO 3. PRUSA MENDEL REPRAP

## 3.1 Introducción

En este capítulo se muestra una guía de montaje paso a paso, además de un listado de los componentes que componen la impresora 3D. Se analizan y comparan las opciones a la hora de introducir la electrónica necesaria y se incluye un apartado sobre posibles errores y soluciones que se pueden encontrar durante la fabricación de una de estas máquinas.

## 3.2 Estructura del soporte:

### 3.2.1 Componentes

Para construir una impresora son necesarios dos tipos de componentes. Por un lado se tienen los denominados imprimibles y por otro lado los no imprimibles (conocidos como vitaminas en la comunidad).

Los imprimibles son las piezas que sostienen y forman la estructura de la impresora. Se adquieren imprimiéndolos con otra impresora 3D. Si no dispone de una impresora 3D con la que fabricar las piezas se pueden adquirir de diversos proveedores, o mecanizarlas si se cuenta con las herramientas necesarias.

Los no imprimibles son todo tipo de varillas, tornillos, tuercas, arandelas, clemas, componentes electrónicos, actuadores (motores), sensores (finales de carrera), etc., los cuales son necesarios durante el montaje de la máquina.

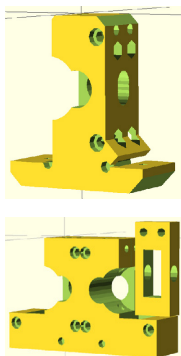
### 3.2.1.1 Componentes imprimibles

Como se ha dicho anteriormente, los componentes imprimibles son las piezas necesarias para sujetar la estructura de la impresora. En la Tablas 1, 2 y 3 quedan desglosadas todas estas piezas. En estas tablas se da el nombre de la pieza, una imagen (para tener una referencia visual), la cantidad necesaria de cada tipo y una breve descripción de su función (más detallada en la sección de Montaje de la estructura), así como el tiempo de impresión aproximado utilizando un extrusor con punta de 0,35 mm.

Debido a los continuos avances llevados a cabo por la comunidad de estas impresoras, es posible que el lector encuentre multitud de mejoras, a parte de las que se comenten más adelante en este proyecto, o posibles alternativas, en diversos repositorios de internet; especialmente en Thingiverse [1]. En algunos casos éstas mejoran a los componentes tradicionales.

Estas son, por tanto, las piezas que te permiten montar la estructura básica, pero estas máquinas pueden personalizarse o mejorarse a gusto de cada usuario. Para conseguir estas piezas en formato .stl puede descargarlas en la página dedicada a la Prusa Mendel dentro de la web del Proyecto Clone Wars [4].

#### Extrusor oficial



Pieza (STL)	Cantidad	Tiempo impresión	Comentarios
compact ex-truder	1	-	Extrusor compacto. Direct Drive. Utiliza un motor paso a paso con caja reductora para empujar el filamento.
dual extruder	1	-	Extrusor dual. Direct Drive. Utiliza motores paso a paso con caja reductora para empujar el filamento.

Tabla 1. Componentes extrusor



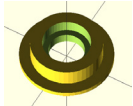
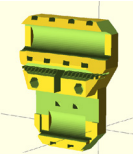
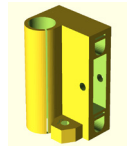
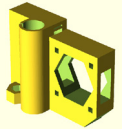
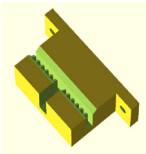
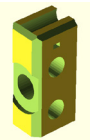
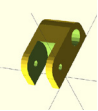
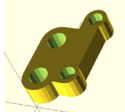


	Pieza	Cantidad	Tiempo impresión	Comentarios
	belt guide	4	00:15:02 a 0.35 los 4	Opcionales. Guías para rodamientos 623zz. Para utilizar los 624zz ir a la sección de Mejoras.
	X carriage	1	-	Carro del eje X. La correa va insertada en una ranura especial para alojarla por lo que no necesita piezas extra para retenerla. Necesita un cuerpo de extrusor especial de montaje horizontal.
	X end idler	1	1h. 31m. a 0.35 y 30mm/sec.	Xend. Extremo de la polea, diseñado para rodamientos 623zz. También válido para 624zz.
	X end motor	1	2h. 24m. a 0.35 y 30mm/sec.	Xend. Extremo del motor.
	Y belt holder	1	00h. 35m. a 0.35 y 30mm/sec.	Alojamiento de la correa del eje Y., diseñado para rodamientos 623zz. También válido para 624zz. La correa va insertada en una ranura especial para alojarla por lo que no necesita piezas extra para retenerla.
	Y corners	4	2h. 37m. a 0.35 los 4 y 30mm/sec.	Pieza de la base del eje Y. El STL contiene una unidad por lo que habrá que imprimir 4.
	Y idler	1	00h. 22m. a 0.35 y 30mm/sec.	Pieza de sujeción de la polea libre del eje Y. Pensada para rodamientos 623zz También válida para 624zz.
	Y motor	1	00h. 22m. a 0.35 y 30mm/sec.	Pieza de sujeción del motor del eje Y.
	Z axis bottom	1	1h. 29m. a 0.35 y 30mm/sec.	Piezas de sujeción para los motores y las barras lisas del eje Z.
	Z axis top	1	00h. 42m. a 0.35 y 30mm/sec.	Piezas superiores de sujeción para las barras lisas del eje Z.

Tabla 2. Componentes imprimibles

## Mejoras y alternativas

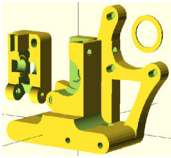
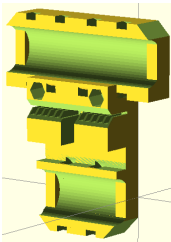
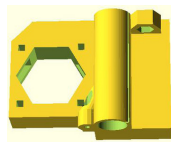
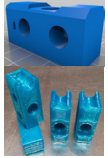
	Pieza (STL)	Cantidad	Tiempo impresión	Comentarios
	Jonas's extruder	1	03:04:43 a 0.35	Extrusor Jonas modificado para poderlo ensamblar en el carro del eje X (a continuación)
	X carriage	1	1h.15m. a 0.35 y 30mm/sec.	Carro del eje X. La correa va insertada en una ranura especial para alojarla por lo que no necesita piezas El hueco de la correa está modificado para conseguir un alineado paralelo de la correa El anclaje del extrusor está diseñado para usarse con una versión del Jonas compatible (Pieza anterior)
	X end motor	1	-	X end motor con ajuste Z. Añadido un tornillo M3 para poder ajustar la altura del end-stop del eje Z
	Y-Corners SmoothBar 10mm	4	2h.37m. a 0.35 los 4 y 30mm/s	Pieza de la base del eje Y modificado para barras lisas de 10mm de diametro. El STL contiene una unidad por lo que habrá que imprimir 4.

Tabla 3. Componentes alternativos

## 3.2.1.2 Componentes no imprimibles

Este grupo de componentes engloba material de ferretería tales como tornillos, arandelas o tuercas de diversas métricas, varillas (roscadas y lisas), rodamientos y muelles; además de elementos electrónicos, como motores, que harán la función de actuadores, finales de carrera, que marcarán el origen o “cero” para que el software pueda controlar la localización de la impresora, clemas, cables, tubo helicoidal y/o tubo de riego, y puntas para conexiones; también otros componentes como correas dentadas; bases, tanto de madera, como de aluminio, como la base caliente o “*heatedbed*” (con su resistencia y LEDs SMD, y un termistor); y bridas y demás componentes auxiliares usados para corregir ciertos defectos que puedan producirse (tal y como se explicará detenidamente en la descripción del ensamblado).

Estos materiales pueden adquirirse de numerosas maneras, incluso es posible encontrar kits que engloban gran parte de los mismos en tiendas online.

La Tabla 4 recoge estos componentes, describiéndolos con su nombre, una imagen (excepto de componentes opcionales o componentes genéricos como tornillos, tuercas, arandelas, cables, clemas, etc.) y la cantidad necesaria de cada uno.



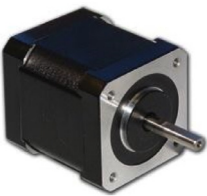





Nombre	Imagen	Cantidad
Motor NEMA 17		5
Correa T2.5 o GT2		2
Rodamiento lineal LM8uu		12
Rodamientos 608zz		3
Rodamientos 623 zz		2
Poleas T2.5 o GT2		3
Varilla roscada M8 acero zincada		4 x 205mm
Varilla roscada M5 acero zincada		2 x 295mm
Varilla roscada M10 acero zinc.		2 x 350mm
Varillas lisas 8mm acero inox.		2x380mm + 2x330mm + 2x320mm
Micro Switch 1A 125VAC 1P2T		5

Tabla 4. Componentes no imprimibles






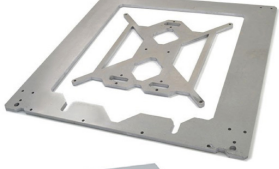

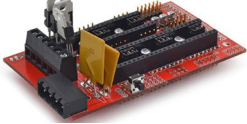

Nombre	Imagen	Cantidad
HeatBed		1
Tuercas, arandelas y tornillos M8		22
Tornillería M10		12
Tornillería M3 y M5 y muelles		Indeterminado
Hotend (extrusor) .35mm		1
Hobbed Bolt (Tornillo con muescas) M8		1
Termistor		1
Marco de aluminio (Mejora, posible en madera)		1
Fuente alimentación 300W		1
RAMPS 1.4		1
Controladores de motores		4

Tabla 4. Componentes no imprimibles



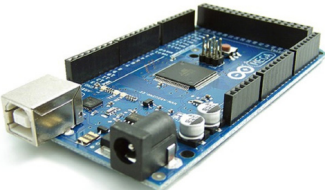




Nombre	Imagen	Cantidad
Arduino Mega 2560 rev. 3		1
Cableado		5x4 (motores) + 5x2 (termistores y finales de carrera)
Bridas		Indeterminado
Espejo + pinzas		1+4
Rollo ABS		1 kg

Tabla 4. Componentes no imprimibles



### 3.2.2 Montaje

Los capítulos de la guía de montaje van separados por las distintas partes que conforman la máquina. Es una guía paso a paso con descripciones detalladas para su realización. Es probable que durante el proceso se deba utilizar acetona para ajustar las piezas impresas, recomendándose el uso de bastoncillos de algodón para tal fin.

#### 3.2.2.1 Capítulo 1: Preparación de varillas

Para comenzar con el ensamblado de la estructura de la Prusa-Medel es necesario cortar las varillas (pues la adquisición más frecuente es en trozos de un metro); aunque si el usuario adquiere las varillas a medida podrá saltarse este paso.

Es necesario que las roscas estén correctas y permiten un paso ligero y veloz, utilícese aceite lubricante si fuera necesario.

Por un lado están las varillas roscadas y por otro las varillas lisas. En las Tablas 5 y 6 se presentan las medidas de los cortes, cantidad de los mismos que son necesarias, así cómo calcular su longitud y un comentario sobre las tolerancias.

#### Varillas roscadas

En total se necesitan 1 M10, 1 M8 y 1 M5 de 1m de largo. Hay que cortarlas de los siguientes tamaños (para obtener las 8 varillas necesarias):

Largo	Cantidad	Tipo	Eje	Cómo calcular el largo	Comentarios
205 mm	4	M8	Y	Separación entre los ejes del hueco de sujeción de las varillas del eje Y (170 mm) + 2 x longitud del hueco de inserción en las piezas de esquina / 2 (2 x 18mm / 2) + 2 x alto de la tuerca M8 y su arandela (2 x 8.5 mm)	Una varilla más larga sobresaldrá por el lateral, pero no afectará al funcionamiento ni incrementará el área total de impresión.

**Tabla 5. Varillas roscadas necesarias**



Largo	Canti- dad	Tipo	Eje	Cómo calcular el largo	Comentarios
350 mm	2	M10	Y	Recorrido mínimo de la base en el eje Y (200 mm) + distancia entre los rodamientos lineales de la base (90 mm) + 2 x longitud del hueco de inserción en las piezas de esquina (2 x 20 mm) + 2 x alto de la tuerca M10 y su arandela (2 x 10 mm)	Se asumen 200 mm de recorrido mínimo en el eje Y. Una varilla más larga permitirá mayor recorrido en el eje Y con lo que incrementará el área total de impresión.
295 mm	2	M5	Z	Distancia entre los taladros de las piezas de sujeción del eje Z (320 mm) - longitud del eje del motor	Se asumen 25 mm para la longitud del eje del motor. Una varilla más larga sobresaldrá por arriba, pero no afectará al funcionamiento ni incrementará el área total de impresión.

Tabla 5. Varillas roscadas necesarias

## Varillas lisas

En total se necesitan 3 varillas lisas M8 de 1m de largo, preferentemente de acero inoxidable pulido o cualquier otro metal que permita un desplazamiento suave de los rodamientos lineales. Hay que cortarlas de los siguientes tamaños (para obtener las 6 varillas necesarias + 1 del extrusor):

Largo	Canti- dad	Tipo	Eje	Cómo calcular el largo	Comentarios
380 mm	2	M8	X	Anchura del marco (370 mm) + 2 x sobresaliente de la pieza final del eje X (2 x 5 mm)	Una varilla más larga sobresaldrá por el lateral, pero no afectará al funcionamiento ni incrementará el área total de impresión.
330 mm	2	M8	Y	Recorrido mínimo de la base en el eje Y (200 mm) + distancia entre los rodamientos lineales de la base (90 mm) + 2 x longitud del hueco de inserción en las piezas de esquina (2 x 20 mm)	Se asumen 200 mm de recorrido mínimo en el eje Y. Una varilla más larga permitirá mayor recorrido en el eje Y con lo que incrementará el área total de impresión.

Tabla 6. Varillas lisas necesarias

Largo	Canti- dad	Tipo	Eje	Cómo calcular el largo	Comentarios
320 mm	2	M8	Z	Distancia entre los taladros de las piezas de sujeción del eje Z (320 mm)	Una varilla más larga sobresaldrá por arriba, pero no afectará al funcionamiento ni incrementará el área total de impresión.

Tabla 6. Varillas lisas necesarias

### Varilla extrusor Wade

Largo	Canti- dad	Tipo	Eje	Cómo calcular el largo	Comentarios
20 mm	1	M8	E	-	Varilla para el extrusor modelo Wade.

Tabla 7. Varilla extrusor

### 3.2.2.2 Capítulo 2: Montaje eje Y

1. Se necesitan 2 varillas roscadas M10-350 mm y 2 varillas lisas M8-330 mm, y un juego de 8 tuercas y arandelas M10 para que queden tal y como se muestra en la siguiente Figura. Es recomendable el uso de doble tuerca en la zona central para una perfecta sujeción al eje Z.





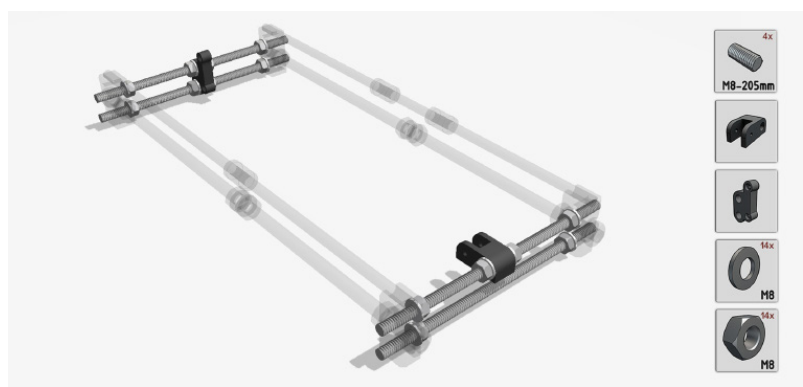
2. Se cogen 4 rodamientos lineales LM8UU y se colocan por las varillas lisas dos a dos.



3. 4 tuercas y 4 arandelas M10 para sujetar las 4 "Y corners" (ver Tabla 2, piezas imprimibles).



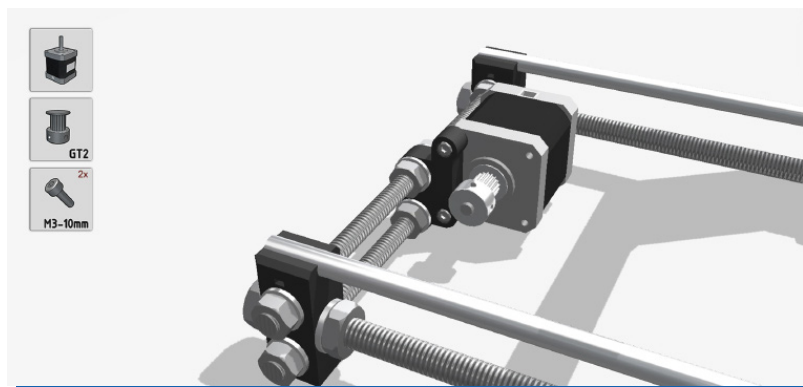
4. 4 varillas roscadas M8-205mm, 14 tuercas y arandelas M8 y las piezas "Y idler" y "Y motor" y se colocan como en la imagen siguiente.



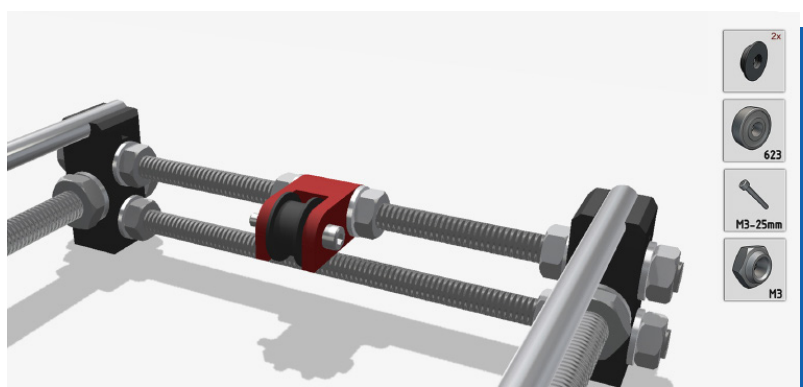
5. Se unen las varillas roscadas a los "Y corners" mediante el uso de 8 arandelas y 8 tuercas M8.



6. Con una de las poleas T2.5 (o GT2) y 2 tornillos M3-10 mm se une un motor NEMA 17 a la pieza "Y motor".



7. Se introduce un rodamiento 623 zz entre 2 "belt guide" y se une a la pieza "Y idler" mediante un M3-25 mm y una rosca M3.

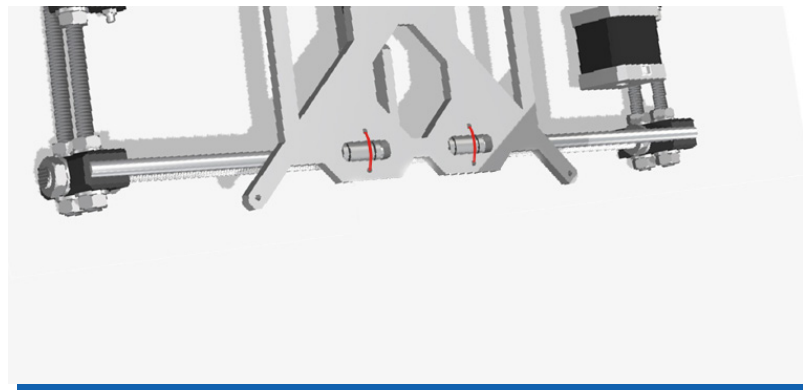




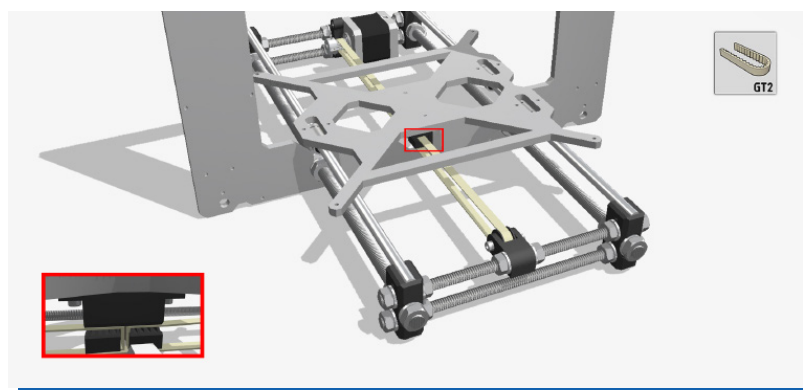
8. A la pieza estructural de aluminio pequeña se le coloca el “Y belt holder” mediante 2 tornillos M3-10 mm.



9. Se une esta pieza estructural a los rodamientos LM8UU mediante bridas pasándolas por los agujeros diseñados con este fin.



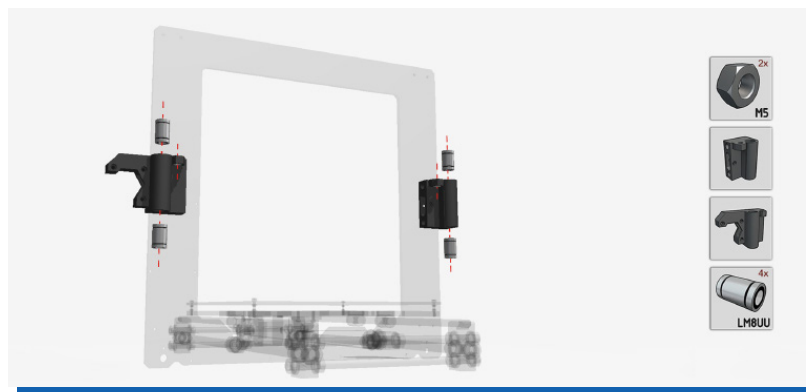
10. Finalmente, se pasa una de las correas T2.5 (o GT2, según el caso) por la polea del motor, la guía sujeta a “Y idler” y se sujeta a “Y belt holder” pasando los dos extremos por el hueco del centro de la pieza.



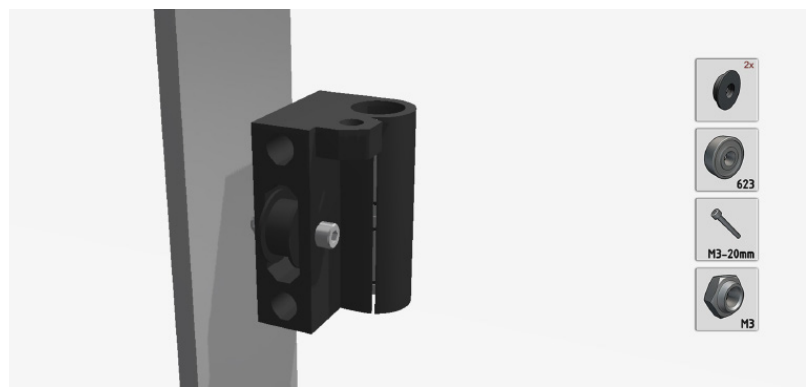
### 3.2.2.3 Capítulo 3: Montaje eje X-Z

Aunque en las imágenes ya aparezca este eje adjunto al anterior, ese paso se realizará al final para facilitar el trabajo.

1. En primer lugar se preparan las piezas impresas “*X end motor*” y “*X end idler*” mediante 2 tuercas M5 (una para cada pieza) y 4 rodamientos LM8UU encajadas en sus respectivos huecos.

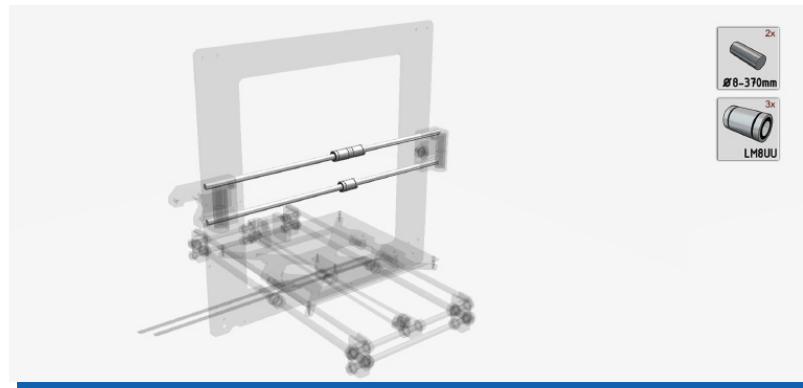


2. Al igual que en el paso 7 del montaje del eje Y, se utilizan 2 “*belt guide*” y juego de tornillo y rosca M3-20 mm para fijar un rodamiento 623 zz a la pieza “*X end idler*”.

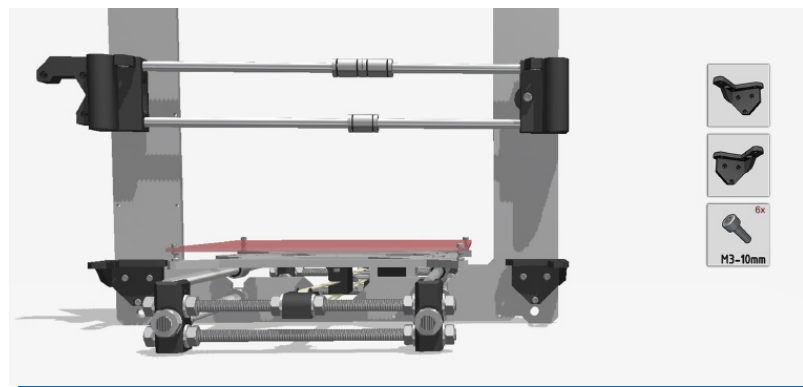




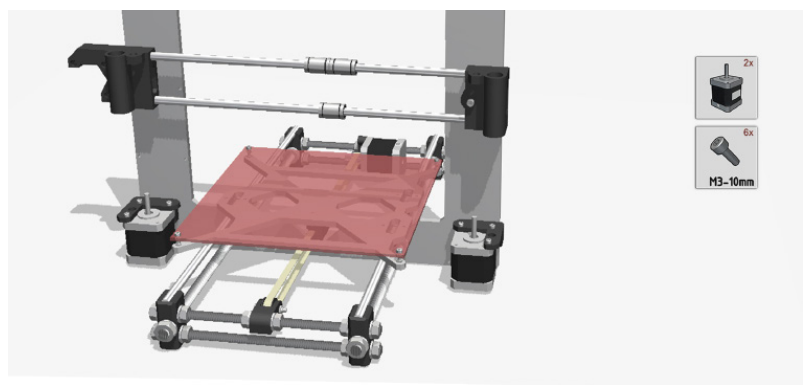
3. Se cogen dos varillas lisas M8-370 mm y 3 rodamientos LM8UU y se colocan, como en la imagen siguiente, atravesando las piezas "X end motor" y "X end idler" por sus huecos. Probable la necesidad de uso de acetona, incluso de taladrar, para facilitar el paso de las varillas hasta fijarlas en su lugar.



4. Se unen los "Z axis bottom" a las esquinas inferiores del marco de aluminio por medio de 6 juegos de arandela, tuerca y tornillo de M3-25 mm en la posición que se ve a continuación.

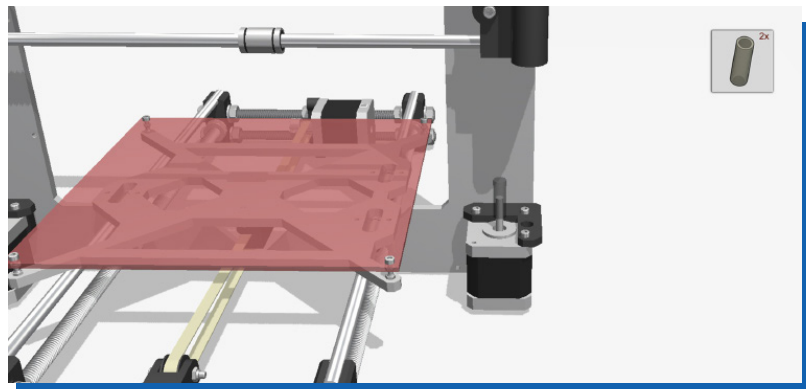


5. Se unen los dos motores NEMA 17 del eje Z a las dos piezas anteriores mediante 6 tornillos M3-10 mm. El diseño de los marcos de aluminio, como en este caso, viene con agujeros en la parte inferior para pasar el cableado a través.

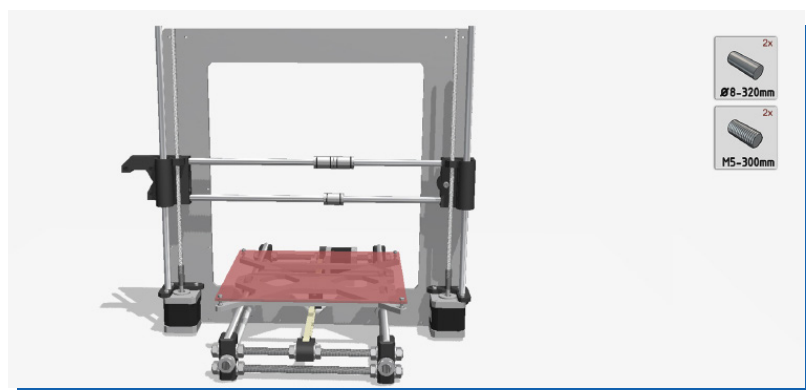




6. Ahora se cogen los dos tubitos flexibles de plástico y se enfundan con los ejes de los motores. Esta pieza es muy importante ya que, si no fuera flexible, el eje Z no podría girar adecuadamente y podría llegar a estropear la impresora. Hay diferentes diseños imprimibles de piezas que sustituyen los tubos, como el presentado en el siguiente link de thingiverse [6].



7. Ahora se une el soporte del eje X con la estructura del eje Z con el uso de 2 varillas lisas M8-320 mm y 2 varillas roscadas M5-300 mm, para ello se atraviesan las piezas "X end motor" y "X end idler" con las varillas tal y como aparece en la siguiente imagen. Se unen las varillas roscadas a los motores haciéndonos hueco con firmeza en el tubito de plástico.

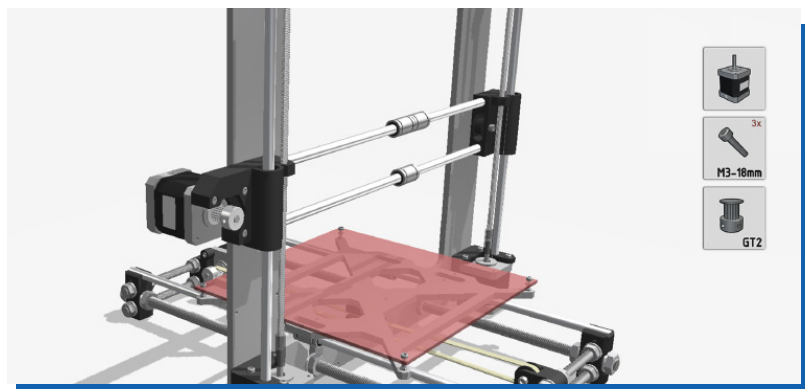




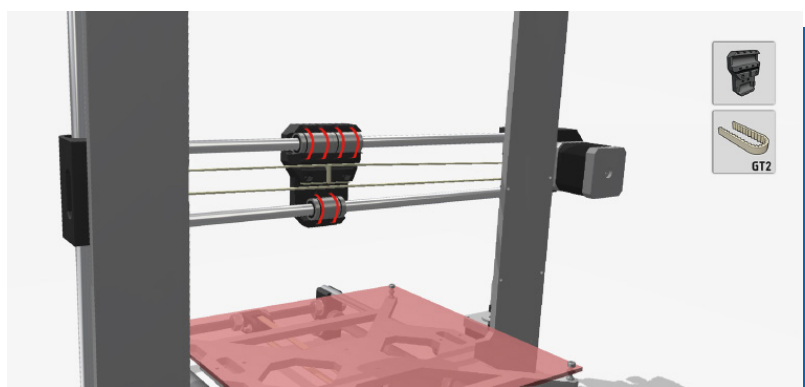
8. Se unen las 2 "Z axis top" a la estructura mediante 4 tornillos M3-10 mm (25 mm si se desea usar arandela y tuerca, por seguridad)



9. Se coge otro de los motores NEMA 17 y se afirma a "X end motor" mediante el uso de 3 ó 4, depende del diseño de la pieza impresa, M3-20 mm y se añade otra polea T2.5 o GT2 que será la que tire de la correa del eje X.



10. Por último se añade la pieza "X carriage" que irá sujeta a los rodamientos del eje X mediante el uso de bridas, y a esta pieza se le sujetará, igual que lo realizado anteriormente en el eje Y, la correa T2.5. Comprobar la correcta orientación respecto a las sujeciones de los ejes.



## 3.3 Extrusor

En esta parte del proyecto se enseñará al lector a construir un extrusor del modelo “*Wade’s Extruder*” y cómo añadirle el *hot-end* modelo *Budaschnozzle 2.0*.

### 3.3.1 Componentes

Al igual que en el caso de la estructura, para construir el extrusor se tienen dos tipos de componentes, unos que podrán imprimirse utilizando una impresora 3D, a los que de nuevo se denominarán componentes imprimibles; y otros que han de adquirirse en tiendas, como son los materiales de ferretería o materiales que habrá que conseguir de tiendas on-line.

#### 3.3.1.1 Componentes Imprimibles

Los componentes imprimibles son aquellos componentes que se pueden construir con otra impresora 3D o que se pueden mecanizar, si se dispone de la maquinaria necesaria con, por ejemplo, fresadoras.

En la Tabla 8 se recogen estas piezas necesarias para construir el extrusor “*Wade’s Extruder*”. Del mismo modo que en la Tabla 2, en la Tabla 8 se puede ver el nombre de cada pieza, una imagen de la misma, el tiempo que aproximadamente tarda en imprimirse y su función. Al ser una pieza de cada tipo no se añade en la tabla la cantidad por imprimir.

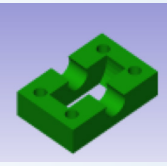
Nombre	Imagen	Tiempo impresión	Función
Cuerpo		1h 30m	Es la parte central que une todas las piezas del extrusor.
Extremo		30m	Mantiene la presión sobre el material para la extrusión.

Tabla 8. Componentes imprimibles extrusor



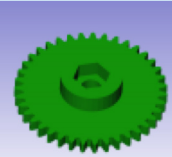

Nombre	Imagen	Tiempo impresión	Función
Engranaje grande		35m	Él mueve el hobbed bolt encargado de agarrar el hilo de material
Engranaje pequeño		15m	Se coloca en el eje del motor y transmite el movimiento al engranaje grande.

Tabla 8. Componentes imprimibles extrusor

### 3.3.1.2 Componentes no imprimibles

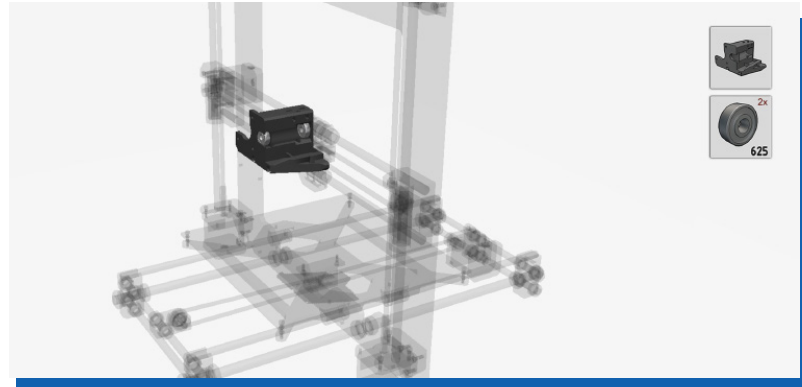
Como se explicó con anterioridad, los componentes no imprimibles son aquellos que deben comprarse. Entre ellos están el *hot-end*, que se puede comprar en tiendas on-line a proveedores extranjeros, en este caso, el *budaschnozzle 2.0* puede adquirirse de la tienda *Cooking-hacks* a través de la web [7].

El resto de materiales, como tornillos, muelles o material específico como el *hobbed bolt*, tornillo de M8x50 mm que a una distancia determinada de la cabeza tiene unas estrías, que son las que permiten que tire del hilo de plástico, pueden comprarse en ferreterías.

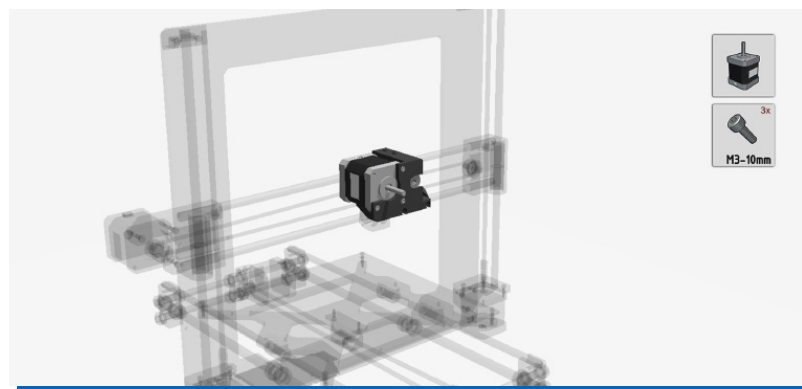
Para más detalle puede ser consultada la Tabla 4 en la que se describen estos materiales por nombre, una imagen (excepto de componentes comunes como tornillos, tuercas, arandelas, clemas, etc.), y la cantidad necesaria de los mismos. Es importante tener en cuenta que si se escogiera otro modelo de extrusor o de *hot-end* estos componentes podrían ser otros y/o podrían variar sus cantidades.

### 3.3.2 Montaje del extrusor

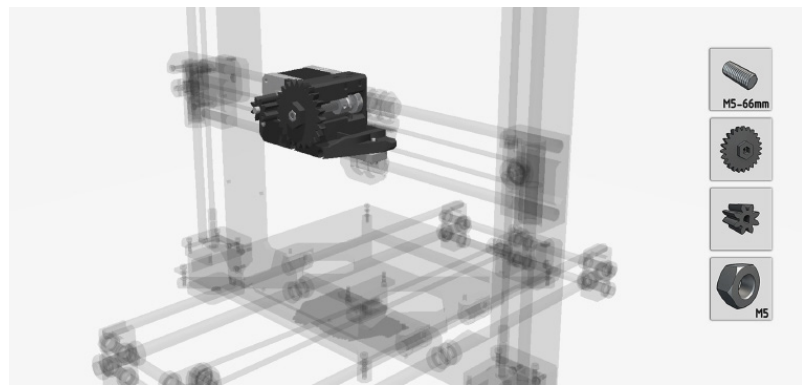
1. A la pieza principal se le añaden dos rodamientos 625 en las posiciones que se puede observar a continuación.



2. Ajustaremos el último motor NEMA 17 que queda a la principal mediante el uso de 3 tornillos M3-10 mm.



3. Se utilizarán los dos engranajes impresos, parte del extrusor Jonas, para unirlos al eje del motor y, el grande, mediante uso del *Hobbed Bolt* (Tornillo con muescas) M8, que atravesará los rodamientos del paso 1. Es posible que sea necesario el uso de arandelas para separar y ajustar las distancias del *Hobbed Bolt* con respecto a los engranajes, así como ajustarlo al final mediante el uso de doble tuerca para conseguir una fijación correcta sin afectar al movimiento de giro.

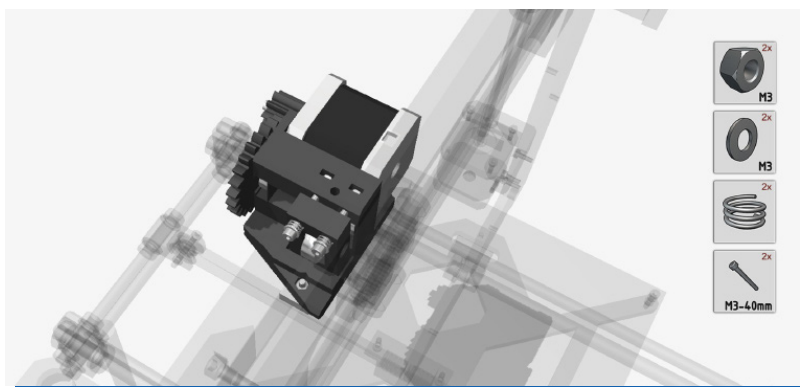




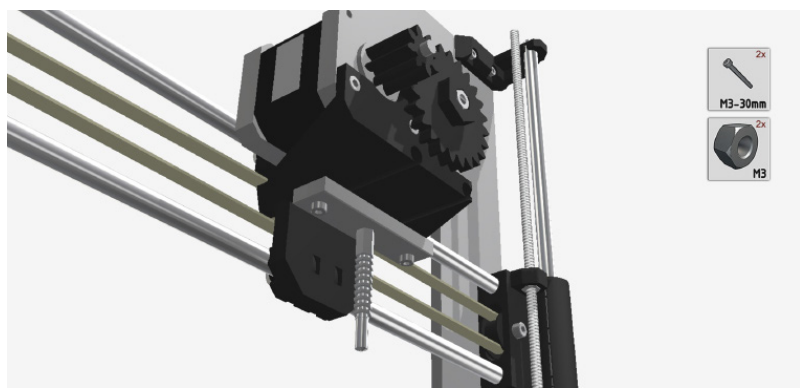
4. Para montar la guía de material con la que se acaban las piezas impresas del extrusor se utiliza la varilla lisa M8-20 mm, que atravesará un rodamiento 608 y se colocará sobre la pieza impresa "extremo". También se le ajustará una tuerca M3 en el hueco interno preparado para ello.



5. Para acabar de montar las piezas sueltas hay que introducir dos tuercas M3 en los huecos de la pieza principal del extrusor que serán enroscadas con dos tornillos M3-40 mm con arandelas y los muelles encargados de mantener una presión constante sobre el hilo de material.



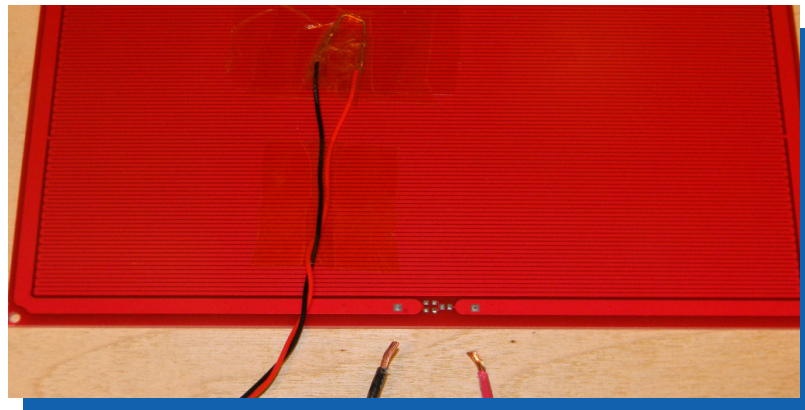
6. Ahora queda terminar de montar la cabeza extrusora, que se hará mediante el uso de 2 tuercas y 2 tornillos M3-30 mm. Hay diferentes modelos, en este caso se utiliza un extrusor *Budaschnozzle 2.0* montado con disipador y punta de 0.35 mm, además de con el termistor *100k Honeywell*.



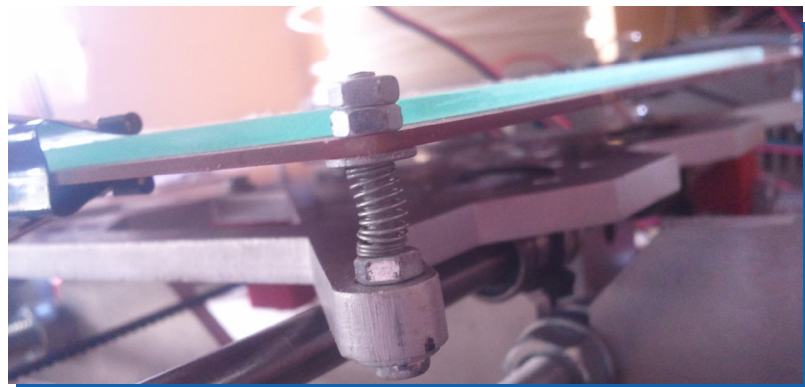
### 3.3.2.1 Montaje HotBed y finales de carrera

Antes de unir ambas estructuras se montará la cama caliente, para ello se comenzará con el cableado.

1. Se suelda el termistor a un par de cables (preferentemente de silicona debido a las altas temperaturas a las que serán sometidos) y se colocará en el centro de la zona de la resistencia de la cama caliente mediante el uso de la cinta Kapton. También se soldarán un par de cables a la entrada de potencia de la resistencia.



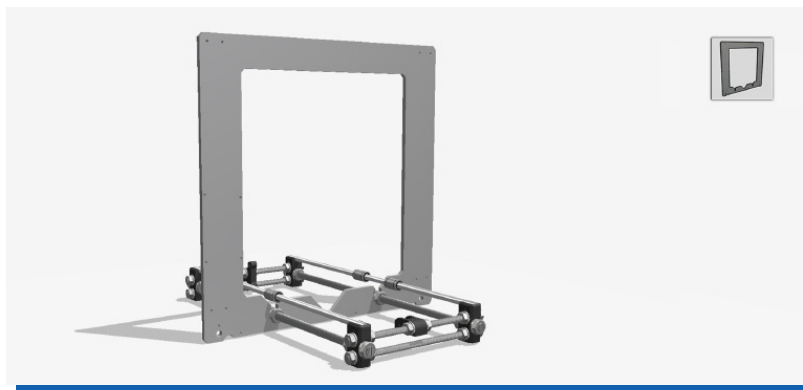
2. Ahora se une la cama a la estructura mediante 4 tornillos M3-15 mm, 12 tuercas, 8 arandelas y 4 muelles (sirven los de los bolígrafos). A diferencia de lo que aparece en la mayoría de instrucciones es recomendable usar un método distinto de fijado que se explica a continuación. Para empezar se introducen los 4 tornillos con arandela por la estructura, mirando hacia arriba, y se fijan con 4 tuercas. Sobre esto, por orden, se colocan los muelles, una arandela, la cama y dos tuercas haciendo tuerca y contratuerca. Esto es así para evitar que se suelte todo por las vibraciones producidas pero sin afectar al movimiento libre de la cama sobre los muelles.







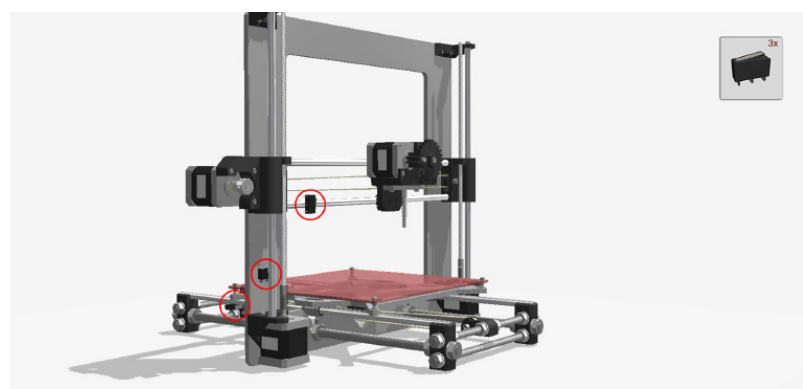
3. Ahora se unen ambas estructuras. Para ello hay que comprobar que la distancia entre ejes es similar (170 mm) y se coloca la estructura X-Z introduciendo las varillas roscadas del eje Y entre sus huecos dejando una tuerca y una arandela a cada lado, tal y como aparece en la siguiente imagen.



4. Ahora se terminará el montaje de la cama caliente añadiéndole el espejo y las 4 pinzas dos a dos.



5. Por último se colocan los finales de carrera. Esto se puede realizar con pinzas, piezas imprimibles o bridas. Los finales de carrera son los que marcan la posición 0 de los tres ejes, de manera que hay que situarlos en los puntos iniciales de los motores como aparece en la siguiente imagen. La conexión se realiza siempre entre los extremos.





## 3.4 Electrónica

Habiendo terminado de ensamblar la impresora con su extrusor llega el momento de hacerle la puesta a punto de la electrónica para así poder comenzar a hacer pruebas de funcionamiento, etc.

En este apartado se comentan los posibles circuitos integrados y microcontroladores que se pueden usar para una impresora 3D. Así pues, en primer lugar se analizan las posibilidades que se tienen, continuando con los componentes, tomando estos como los comunes en la mayoría de las posibilidades que se comenten; se describe como se realiza la conexión de los distintos elementos de la impresora (motores, *hot-end*, *heated bed*, termistores, etc.) a la placa electrónica; y, concluye con el montaje de la electrónica en la impresora.

### 3.4.1 Posibilidades

Se han desarrollado, hasta la fecha, multitud de posibilidades también en cuanto a electrónica, y contamos así con una amplia gama de productos entre los que se puede elegir para configurar la impresora.

Entre estas posibilidades se encuentran microcontroladores tan conocidos como la familia de los *Arduino*, modelos como el *Mega 2560*, el *Mega* (o *ATmega*) *1280*, etc.; que deberán ir con un circuito integrado como, por ejemplo, el modelo denominado *Ramps*; que será objeto de estudio en este PFC por ser, el modelo *Ramps 1.4*, el elegido para la impresora. También se encuentran otros modelos como el denominado *Gen*, y otras placas, como las modelo *Sanguinololu*, que incorporan tanto el microcontrolador como el circuito integrado en una sola placa.

Se empieza hablando de la opción consistente en la unión de un microcontrolador *Arduino Mega 2560* y un circuito integrado *Ramps 1.4*.

Estos circuitos integrados pueden adquirirse teniendo los componentes por un lado y el circuito impreso por otro, y requiriendo, por tanto, ser soldado por el comprador; o, pueden adquirirse completamente soldados y listos para su conexión y configuración, que es la opción elegida en este PFC. Si el lector prefiere soldar su propia placa, que en la mayoría de los casos puede resultar más económico, dispone de unas instrucciones ilustradas, paso a paso, en la web [8] para soldar precisamente el modelo *Ramps 1.4*.



Las siglas RAMPS, provienen de “*RepRap Arduino Mega Pololu Shield*”, su circuito impreso tiene la forma que se muestra en la Figura 14.

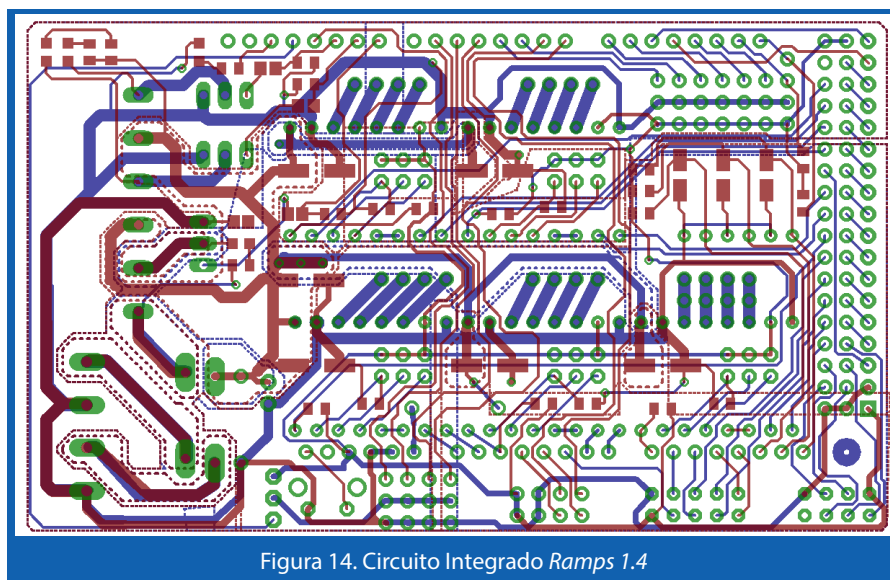


Figura 14. Circuito Integrado Ramps 1.4

Entre sus características destacan las siguientes:

Si se encuentra soldado un diodo modelo 1N4004 conectando la tensión de entrada de la RAMPS a *ArduinoMEGA*, que será el caso normal, se debe alimentar el circuito a 12 V DC como máximo. Si no existiera tal diodo, se puede alimentar hasta un máximo de 35 V, pero esta opción no es recomendada.

Lleva conexiones para tres Mosfet (tipo canal N), para calentar la placa base o *heated bed* y el *hot-end* y otro para dar funcionamiento a un posible segundo *hot-end* de otro extrusor.

Tiene dos circuitos para conectar un termistor en la *heated bed* y otro en el *hot-end* y así poder monitorizar la temperatura a la que ambos se encuentran.

Las conexiones para los *Pololus* (controladores de los motores paso a paso) se encuentran en la parte superior, haciendo fácil las posibles conexiones o desconexiones futuras de los mismos, porque se quiera actualizar la placa con modelos nuevos que pudieran desarrollarse o simplemente por un posible fallo que ocasione la necesidad de reemplazar alguno de estos *Pololus*. Lleva capacidad para conectar hasta cinco *Pololus*, tres para controlar los motores de los tres ejes de movimiento (X, Y, Z) y dos más para los motores de los extrusores; así que permite la inclusión de un segundo extrusor. Esto está disponible desde la versión *Ramps 1.3*.

Las conexiones de los motores, finales de carrera y termistores son del tipo de las conexiones para servos, realizándose como se explica más adelante, haciendo que la conexión/desconexión sea sencilla.

Además tiene pines *SPI* e *I<sup>2</sup>C* disponibles para posibles expansiones futuras.

Esta placa integrada (ver Figura 15) va conectada a un microcontrolador *Arduino* modelo *Mega 2560*, aunque podría conectarse también a otros modelos de *Arduino* como el *Mega 1280*; que es la opción de compra que dan algunos proveedores como *RepRap World*. Es este microcontrolador el que tiene el puerto USB 2.0 tipo B para conectar la impresora a un ordenador.

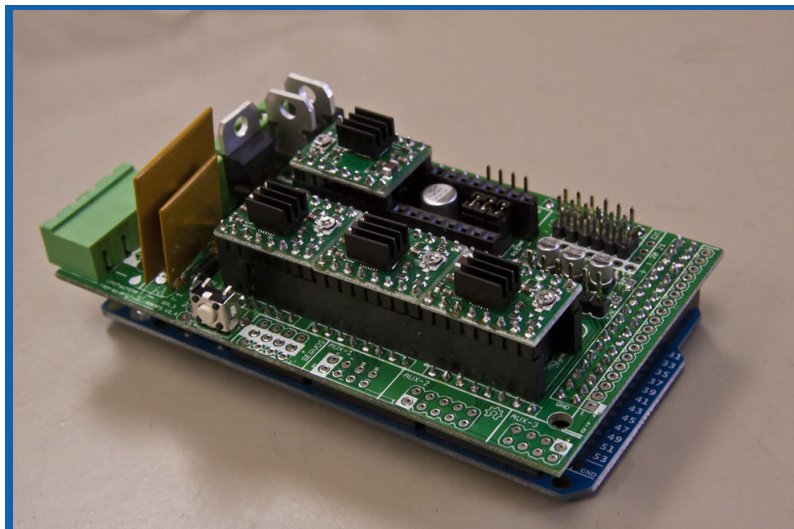


Figura 15. *Ramps 1.4* completamente ensamblada

Para cualquier información adicional que necesite comprobar el lector, puede recurrir al blog de *RepRap* que se encuentra en la web [9].

Hay otras opciones a configurar como la posibilidad de usar el circuito integrado *Gen*, pero en las primeras versiones de nuevos firmware más robustos y eficientes como *Marlin*, comentados más adelante, no incluyen aún una configuración compatible con estos circuitos integrados.

Sin embargo una opción que ha cobrado muchísima fuerza es la de configurar la impresora con una placa *Sanguinololu*. Como se ha comentado, esta placa incorpora las funciones del circuito integrado y del microcontrolador, y al solo tener que comprar un placa hace que sea económicamente más viable que las opciones de *Arduino* + *Ramps*. De hecho, esta opción la que ha desbancado un poco a las *Ramps*.



La placa *Sanguinololu* puede adquirirse también soldada completamente y prácticamente lista para configurarla, o, como la *Ramps*, obtener la placa por un lado y los componentes por otro y tener que soldarlos. Sin embargo, en este caso existe una complejidad añadida, y es la necesidad de soldar el chip *FTDI*, que tiene un patillaje *SMD*, por lo que es recomendable que si el lector no es un experimentado soldador de componentes electrónicos compre la placa completamente ensamblada.

La última actualización de la *Sanguinololu* es la 1.3b, y data del día 4 de Abril de 2012, aunque existen versiones anteriores como la 1.3a de Julio de 2011, que son igualmente compatibles para la impresora y los firmware disponibles; de hecho, la diferencia entre la versión 1.3a y la 1.3b es que en esta última los componentes son *SMD* (lo cual hace que ser soldada por el usuario sea mucho más difícil).

A parte de la diferencia principal de incorporar en una sola placa las funciones que tenemos con la opción *Arduino + Ramps*, cabe destacar que se diferencia de esta última opción en que el microcontrolador es el *Atmel ATmega644P* o el *ATmega1284* (según la versión); para las conexiones, en lugar de usar conectores del tipo de los servos, se usan conectores *Molex*; o, que tiene más pines libres para ampliaciones futuras entre los que tenemos pines *GPIO*, *I2C*, *SPI*, *USART* y *ADC*.

En la Figura 16 se puede contemplar una imagen de la placa sin componentes.

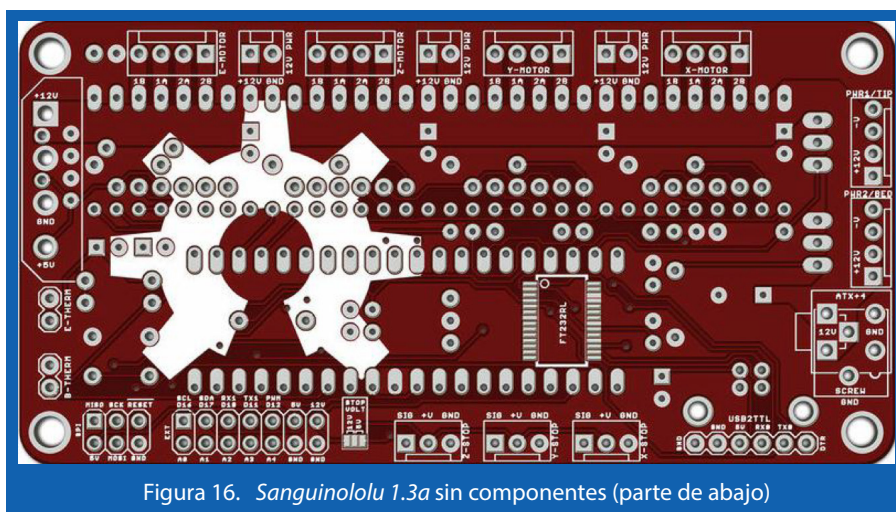


Figura 16. *Sanguinololu* 1.3a sin componentes (parte de abajo)

Y en la Figura 17 se muestra la placa completamente ensamblada.

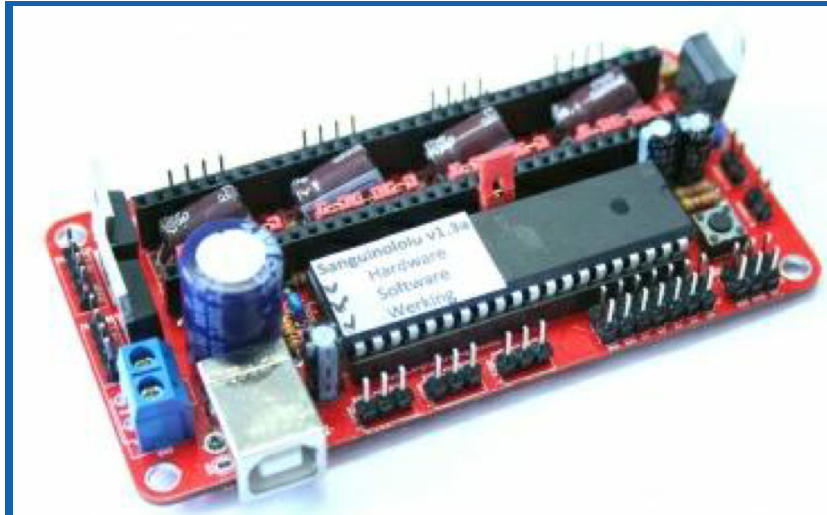


Figura 17. Sanguinololu 1.3a completamente ensamblada

### 3.4.2 Componentes Característicos

Sea cual sea la opción escogida, el circuito estará compuesto por una serie de componentes como resistencias, condensadores, pines, etc.

En este apartado del proyecto se describen los componentes más significativos de la placa electrónica, como son el conector USB, el botón de reset, los drivers de los motores (*Pololus/Stepstick*), los jumpers, o los mosfet.

Además se describen otros componentes electrónicos que forman parte de la estructura de la impresora, y cuyo ensamblado se describió en el apartado *Estructura del Soporte*, como son los finales de carrera y los motores paso a paso.

Y se concluye con una breve descripción de los requisitos de la fuente de alimentación que se debe usar para la impresora.





### 3.4.2.1 Conector USB

El conector USB, como se ve, tanto en la imagen de la Figura 15 como en la imagen de la Figura 17, que muestran las placas *Arduino Mega 2560* con *Ramps 1.4* y la *Sanguinololu 1.3a* respectivamente, deben ser de tipo B. Servirá para conectar la electrónica a un ordenador desde el que se controlará la impresora. Esta conexión USB servirá por tanto para la comunicación de datos entre el ordenador y la impresora, pero además servirá para suministrar una alimentación de 5 VDC al microcontrolador.

### 3.4.2.2 Botón de Reset

El botón de reset no es un elemento crítico para la electrónica, aunque puede ser tremendamente útil, sobre todo en la etapa de calibración o pruebas, para reiniciar la impresora rápidamente sin tener que cortar la alimentación a la misma, en caso de tener algún problema. Este botón es más accesible en los modelos de *Ramps* que en la *Sanguinololu*, como puede verse en las imágenes de las mismas que se recogen en las Figuras 15 y 17 respectivamente.

### 3.4.2.3 Drivers para los motores

Los drivers para controlar los motores paso a paso son unos microcontroladores, más pequeños, que conectamos a la placa electrónica, tanto a la *Sanguinololu*, como a la *Ramps* (en el caso de *Arduino* + *Ramps*). En concreto, se usan los del modelo *Pololu A4988*, que es el modelo de la Figura 18; aunque algunos proveedores venden otro modelo que imita al *Pololu A4988* y que es de menor coste que el primero, el modelo *Stepstick*.

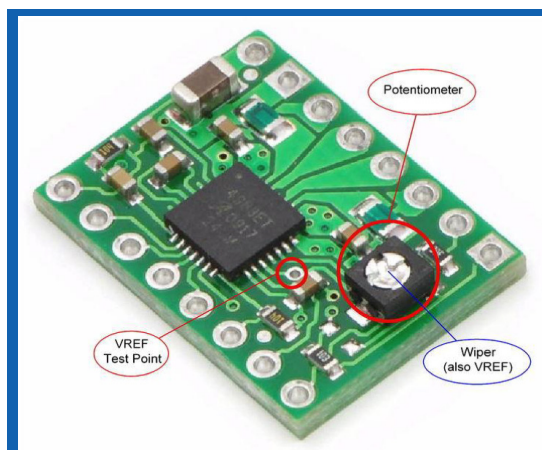


Figura 18. *Pololu A4988*

También se usa el modelo *Pololu A4983*, que es exactamente igual que el *Pololu A4988*, mostrado en la Figura 18, en cuanto a funcionalidad, pero este último lleva integrado un diodo de protección contra sobrecorrientes que no lleva el primero.

Estos elementos se instalan en los pines destinados para ello de la placa electrónica, quedando como se muestra en la imagen de la Figura 19.

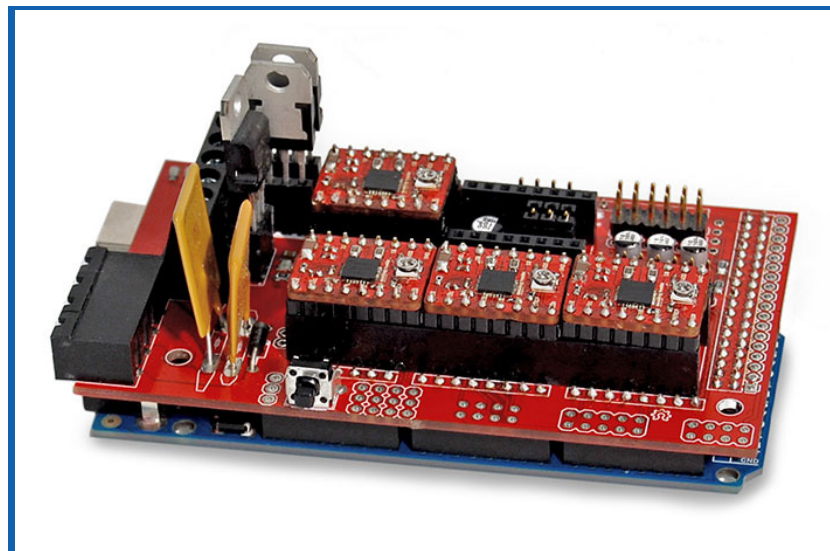


Figura 19. Conexión de *Pololus* en la *Ramps 1.4*

En la Figura 19 se han colocado los cuatro *Pololus* en sus respectivas posiciones dentro de un circuito integrado modelo *Ramps 1.4*.

La función de los *Pololus* es ordenar el movimiento de los motores paso a paso, a través de impulsos eléctricos. La magnitud del movimiento la determinará el usuario a través del ordenador, mientras no se esté imprimiendo; o, el propio Software de control mientras se ejecuta una impresión.

Los *Pololus*, así como los *Stepstick*, llevan integrados un potenciómetro para regular la corriente que le suministraremos al motor, que estará en función de la carga a mover, y que se debe calibrar como se muestra posteriormente en este documento.



### 3.4.2.4 Jumpers

Los jumpers son unos elementos que nos permiten unir dos pads de un circuito integrado cuando no se puede hacer la unión con una pista, o cuando su unión es, como en esta ocasión, una cuestión de calibrado. Con los jumpers se puede calibrar la precisión del control de movimiento sobre los motores.

En la imagen de la Figura 20 se puede ver dónde van colocados en la placa *Ramps*, que sería justo debajo de la posición en la que posteriormente se instalarían los drivers de control de cada motor (los *Pololus*).

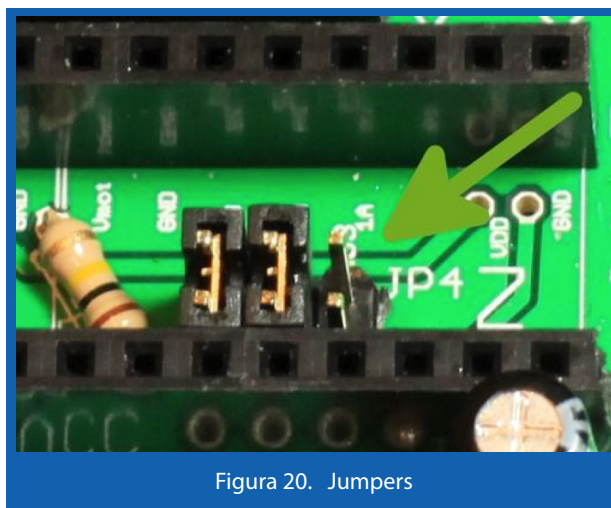


Figura 20. Jumpers

En esta Figura 20 vemos cómo ya se han colocado dos de los tres jumpers que hay que colocar, el tercero iría en la posición señalada por la flecha, para conseguir una configuración de 1/16, lo que significa que cada paso del motor paso a paso, cuyo movimiento es controlado, se puede dividir en 16 “micropasos”, consiguiendo así mayor precisión en el control de movimiento del motor; pudiendo así hacer movimientos más pequeños con gran precisión.

### 3.4.2.5 MOSFET

El último elemento característico de las placas electrónicas, son los transistores MOSFET. Las siglas MOSFET significan “*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*”, es decir, “Transistor de Efecto de Campo Metal Óxido Semiconductor”. Llamados así porque en la patilla *gate* o puerta, a través de la cual se controla el paso de corriente de la patilla *source* o fuente a la patilla *drain* o drenador (también conocido como “sumidero”), está



conectada a un metal, separado del semiconductor por un óxido. Funcionando de forma similar a un condensador, de tal forma que permite polarizar el transistor, hacer que funcione, pero no consume energía por la puerta; es decir, que no hay corriente pero sí tensión. Esto quiere decir que se controla el paso de corriente mediante aplicaciones de tensión; de esta forma, en modo estático, o reposo, el transistor apenas consumirá energía pues el valor de la corriente será del orden de nanoamperios.

En el circuito de este PFC se tienen tres mosfet de canal N, esto significa que la tensión a aplicar en la patilla puerta, para que pase corriente de la fuente al drenador, debe ser positiva. Si fueran canal P serían similares pero la tensión aplicada debería ser negativa.

Se utilizan dos de esos tres MOSFET para controlar el calentamiento de la base, *heated bed*, y del *hot-end*. El tercer MOSFET se usa para controlar el funcionamiento de un segundo extrusor.

Para el calentamiento de la base, a 130 °C, que es la temperatura de trabajo al imprimir con ABS, se necesita un suministro de unos 11 A; para calentar el *hot-end*, a 225/230 °C, que es la temperatura para extruir el ABS, es necesario una alimentación de unos 2,5 A. Estos valores de corriente serán los que determinen, si un MOSFET es apropiado o no para la electrónica; por eso se debe tener cuidado y asegurar de que se compran los componentes correctos.

Sin embargo, no es ese el único parámetro característico para determinar si el MOSFET es apropiado o no, porque, por ejemplo, algunos proveedores venden con la electrónica el *modelo P30N06LE*, y, sin embargo, el modelo recomendado para la impresora sería el *STP55NF06L*. Según sus hojas de características, ambos soportan una corriente de hasta 60 amperios, sin embargo tienen dos diferencias importantes.

La primera es la tensión de activación, el *modelo P30N06LE* se activa con 3 V, y el *modelo STP55NF06L* se activa con 5 V; y, la electrónica utilizada en este PFC emplea una tensión de 5 V para activarlos. Aun así, la hoja de características del *modelo P30N06LE* apunta que soporta valores comprendidos entre -8 y 10 V, luego no debería de ser un problema.

La segunda diferencia, probablemente la más importante, es que el parámetro *R<sub>dson</sub>* es diferente en ambos; siendo de 0,047  $\Omega$  para el *modelo P30N06LE* y 0,018  $\Omega$  para el *modelo STP55NF06L*. Este parámetro determina la duración de los periodos de carga y descarga del MOSFET; siendo el modelo con menor valor de *R<sub>dson</sub>* el que se carga y se descarga más rápido. El problema es que en



estos periodos de carga y descarga es donde más se calientan los MOSFET por eso interesa que sean lo más rápidos posibles.

Si bien es cierto que, alcanzada la temperatura de trabajo, el MOSFET actúa como un termostato, encendiéndose y apagándose cada poco tiempo, los usuarios de una electrónica con el *modelo P30N06LE* señalan que tardan mucho más en alcanzar la temperatura de trabajo y han tenido más problemas de calentamiento de los mismos que los usuarios del *modelo STP55NF06L*.

El transistor *modelo STP55NF06L* es el mostrado en la Figura 21.

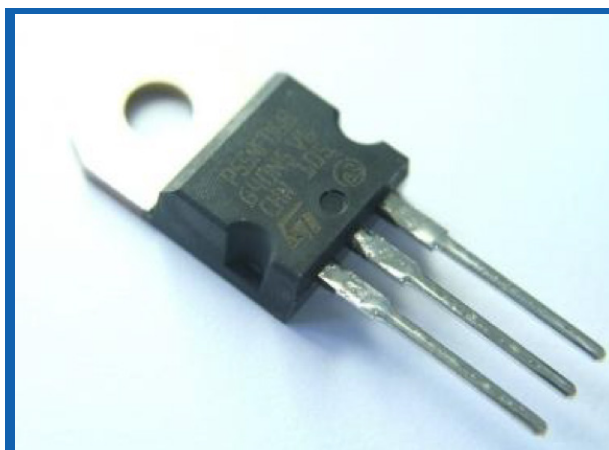


Figura 21. MOSFET canal N, STP55NF06L

### 3.4.2.6 Motores paso a paso

A continuación, como se dijo al inicio del epígrafe, se habla sobre otros dispositivos electrónicos cuyos parámetros también son críticos para el funcionamiento correcto de la impresora 3D, y que no están integrados en la placa electrónica; uno de ellos son los motores paso a paso.

El motor paso a paso elegido para este PFC es el NEMA 17, pero dentro de este modelo existen motores de diferentes pares, de diferentes tensiones y corrientes de alimentación y motores bipolares y unipolares; aunque en este último caso, es el parámetro que menos importa, ya que se pueden usar motores bipolares o unipolares en la Prusa Mendel.

En cuanto al par, se necesitan motores de 0,137 N·m (13,7 N·cm), como mínimo, para los motores que gobiernan el movimiento de los tres ejes (X, Y, Z), y un motor de 0,4 N·m (40 N·cm), como mínimo, para el motor que desplaza el hilo de plástico a través del extrusor y lo empuja para ser extruido en caliente.

Por otro lado está la alimentación de los motores. Los controladores *Pololu*, drivers de los motores (ya comentados), utilizan un modo de control a corriente constante, de modo que la fuerza que hace el motor depende de la corriente, y no de la tensión, de alimentación. Los valores de tensión y corriente que da el fabricante permiten conocer los parámetros máximos del motor. Así pues, operando a esa tensión y a esa corriente nominal, el motor dará el par nominal y su vida útil será larga; por el contrario, alimentándolo a más de eso se sobrecalentará y durará menos tiempo.

Que un motor de 2,5 A se controle a 250 mA hace que éste entregue un par muy inferior a su par máximo, pero suele resultar más que suficiente para una operación correcta de la impresora 3D. En el control a corriente constante la resistencia del devanado es importante, así los motores se suelen controlar con una alimentación varias veces superior a la tensión nominal del motor para poder conseguir mejores prestaciones; sin por ello comprometer la salud del motor. Luego, si el motor es de 12V y el control trabaja a 12V no se podrá conseguir tan buen rendimiento como si, por ejemplo, el motor es de 3.1V a 12V; ya que, en ese caso, es cuatro veces la tensión nominal.

Conocidos estos conceptos se puede establecer que los motores de 3,1 V/2,5 A son muy apropiados para la construcción de la impresora 3D; y estos son los que vende, por ejemplo, el proveedor *RepRap World*. Aunque se puede jugar con los parámetros, siempre que entren en las especificaciones de par y aguanten el suministro de potencia de alimentación, para conseguir modelos, tal vez, económicamente más viables.

El modelo de motor paso a paso, Nema 17, que vende *RepRap World* y que se muestra en la Figura 22, es, como se ha dicho de 3,1V/2,5 A, y tiene un par máximo de 0,471 N·m (47,1 N·cm).

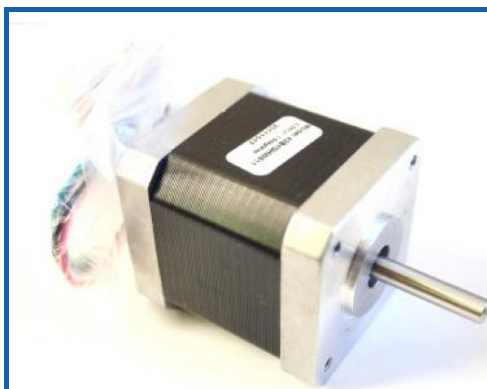


Figura 22. Motor paso a paso, Nema 17, de *RepRap World*

### 3.4.2.7 Fuente de alimentación

Otro de los componentes de la impresora es la fuente de alimentación. De este dispositivo, no es crítico el modelo en concreto, pero sí que debe darnos una salida con 12 V DC y unos 16 A en la misma, pues se necesitan entre 11 y 12 amperios para la base, 2,5 A para el *hot-end* y, aproximadamente unos 250 mA por motor para el movimiento de los ejes y del filamento de plástico por el extrusor. Esto significa que la fuente debe ser, como mínimo, de 200 W, en el caso de este PFC la fuente es de 300 W, y todo el funcionamiento es correcto.

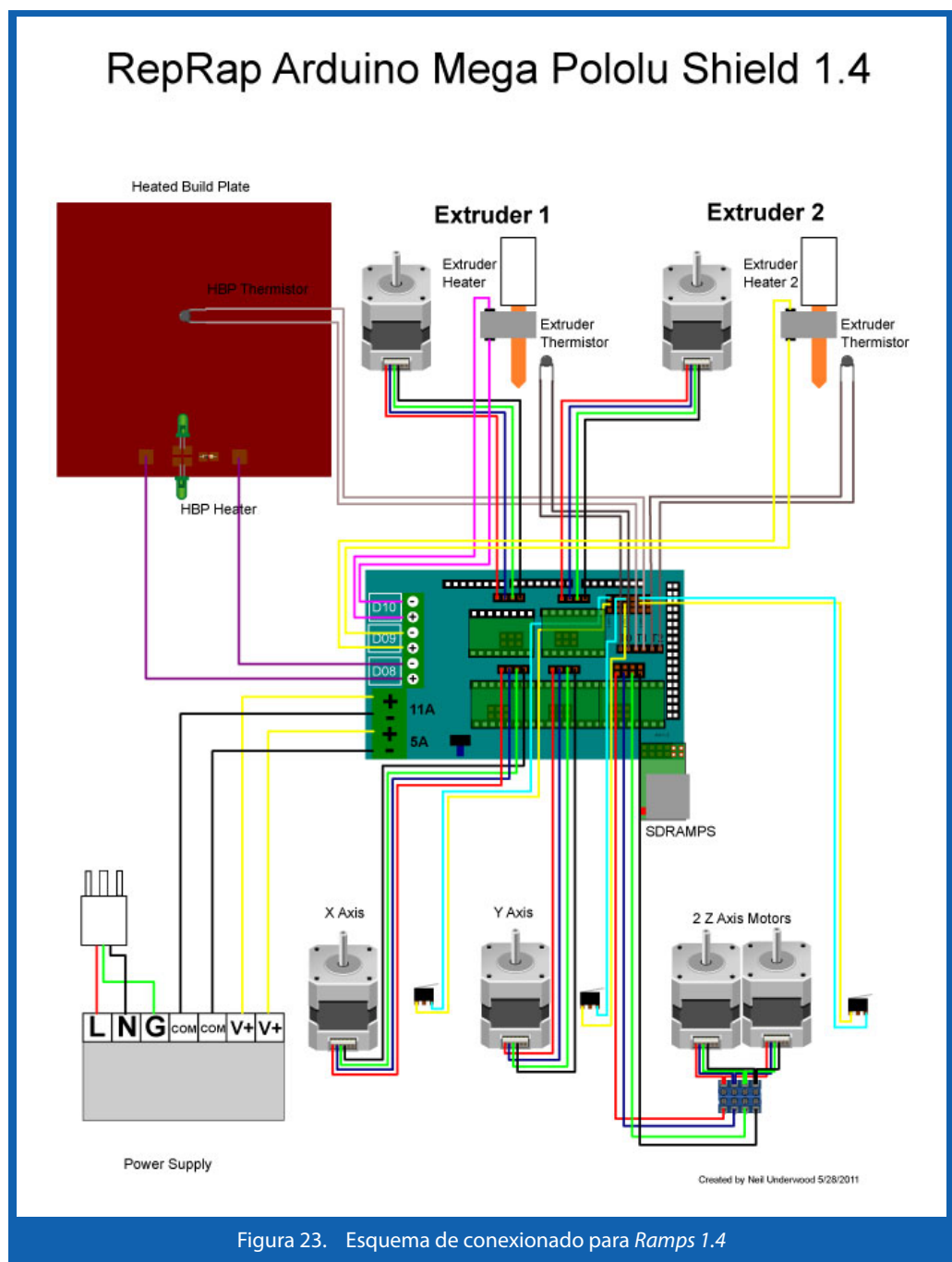
### 3.4.3 Conexiones

En este apartado se describirá a través de sencillos esquemas y explicaciones de los mismos, cómo se conectan todos los dispositivos de la impresora a la placa electrónica de la misma.

Nuevamente se desarrolla la explicación de cara a dos de las posibilidades en cuanto a electrónica, la opción *Arduino + Ramps* y la opción con *Sanguinololu*, y dentro de éstas, para la versión *Ramps 1.4*, que además será la opción más detallada, y para la versión de la *Sanguinololu 1.2*. No es crítico el modelo de *Arduino* en el caso de *Arduino + Ramps*, para hacer las conexiones, ya que éstas se realizarán sobre el circuito integrado, es decir, sobre la *Ramps*.

### 3.4.3.1 Conexiones para la Ramps 1.4

El esquema de conexiones para la *Ramps 1.4* es el mostrado en la Figura 23.





Se observa, en el esquema de conexiones, la conexión para los finales de carrera mecánicos de cada eje. Aunque en este esquema se muestra la conexión a dos hilos que se comentó en la parte Estructura del soporte/Montaje, tenemos tres pines de conexión y es muy probable que el proveedor venda el cableado con un conector de tres terminales. Si esto es así y el lector decide seguir la conexión expuesta en este documento no hay más que, o bien cortar el hilo no usado de cada final de carrera, o bien agruparlos y dejarlos apartados.

En la parte media derecha vemos otros seis pines, dos para cada termistor; el de la *heated bed* y el de cada extrusor.

Por último falta por explicar las conexiones realizadas en las clemas que lleva integradas la *Ramps 1.4* en su parte izquierda (según el esquema de la Figura 23). En la parte inferior va una clema con cuatro bornes, donde se conectará la alimentación principal proveniente de la fuente de alimentación.

Los dos bornes inferiores son la alimentación para los extrusores y los controladores paso a paso. Estos bornes están marcados por 5 A. Los dos bornes superiores alimentan la base caliente y necesita un mínimo de 11 A. Si ambos carriles de alimentación están conectados a la misma fuente de alimentación, ésta deberá tener una capacidad mínima de 16 A.

Por encima de este carril se encuentran otros de seis bornes donde, los dos bornes de más arriba están destinados a conectar el *hot-end*, los dos hilos que provenían de la resistencia de potencia del mismo y que sirve para calentarlo (al dar alimentación a una resistencia no importa la polaridad por lo que da igual qué hilo vaya en cada borna); los dos del centro son para el posible segundo extrusor; y las dos de más abajo conectan los hilos de alimentación de la *heated bed*. Esas tres conexiones (*hot-end* 1 y 2 y *heated bed*) van conectadas internamente en la placa a los tres MOSFET, cada una a uno, que se encargan de controlar el paso o no de la corriente a los tres dispositivos conectados, de manera que se puede controlar cuando estos tres dispositivos serán alimentados, para regular así las temperaturas de la *heated bed* y del *hot-end*.

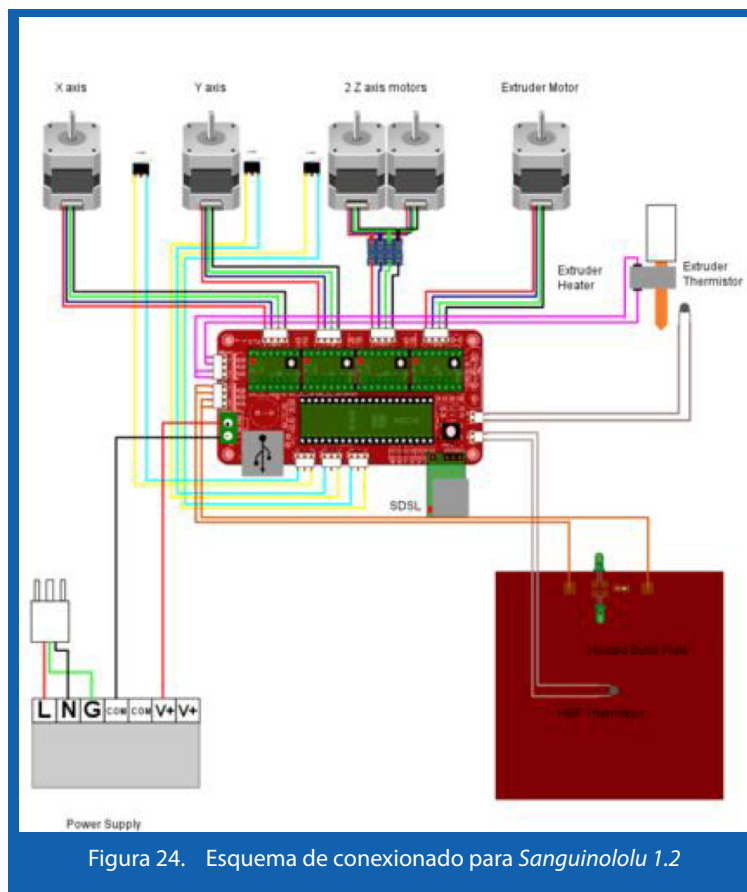
Los cuatro drivers permiten controlar el movimiento del motor del X, el del eje Y, los dos del eje Z y el del extrusor, que es el que impulsa el plástico para que sea extruido. Los motores del eje Z tienen que ir, como se muestra en el esquema, a un carril, y de esta a la placa electrónica. En este caso la *Ramps 1.4* viene con la salida del eje Z con una doble fila de pines, de manera que no es necesario puentear los pines de los motores.

En la parte inferior derecha hay otros cuatro pines, donde dos son para cada termistor, el de la *heated bed* y el del extrusor. Tanto estas conexiones de los termistores, como las anteriormente explicadas de los finales de carrera, se

realizan también con conectores del tipo de los servos, solo que para los finales de carrera se encuentra un conector de tres terminales y para los termistores, se pueden usar dos conectores de dos terminales cada uno (así cada termistor queda conectado por separado); o, se pueden conectar a uno de cuatro terminales, ya que los cuatro pines están juntos.

### 3.4.3.2 Conexiones para la Sanguinololu 1.2

El esquema de conexiones para la placa *Sanguinololu 1.2* es el mostrado en la Figura 24.



Como se observa en el esquema de la Figura 24, las conexiones son muy similares a las que se han explicado para la *Ramps*, aunque, lógicamente, con otra distribución de los elementos.





Las diferencias más apreciables son que los conectores, en lugar de ser los modelos de los servomotores, son Molex; y, que la base caliente, *heated bed*, no tiene un terminal conectado directamente a la fuente sino que van los dos a la *Sanguinololu*. También hay otros dos aspectos destacables, uno es que en esta versión de la *Sanguinololu*, la 1.2, no hay pines o bornes destinados a la conexión de un posible ventilador (aunque las versiones posteriores ya si lo llevan incorporado); y, el otro, es que se muestra muy claramente la posición y orientación exacta en la que debe ir colocado el driver de cada motor, cosa que no ocurría en el esquema de la *Ramps* y que puede ser de gran ayuda y evitar cometer errores de conexión que podrían provocar incluso la pérdida funcional de los drivers mal conectados, o provocar perder gran cantidad de tiempo en buscar errores porque la impresora no funcione.

#### 3.4.4 Montaje de la electrónica en la impresora y acabado del cableado

Una vez se hayan realizado las conexiones se puede proceder a colocar la placa electrónica. Para ello hay diferentes opciones. Algunos marcos de aluminio vienen preparados para integrar la placa *Arduino* a ella, dejándolo tal y como aparece en la Figura 25.

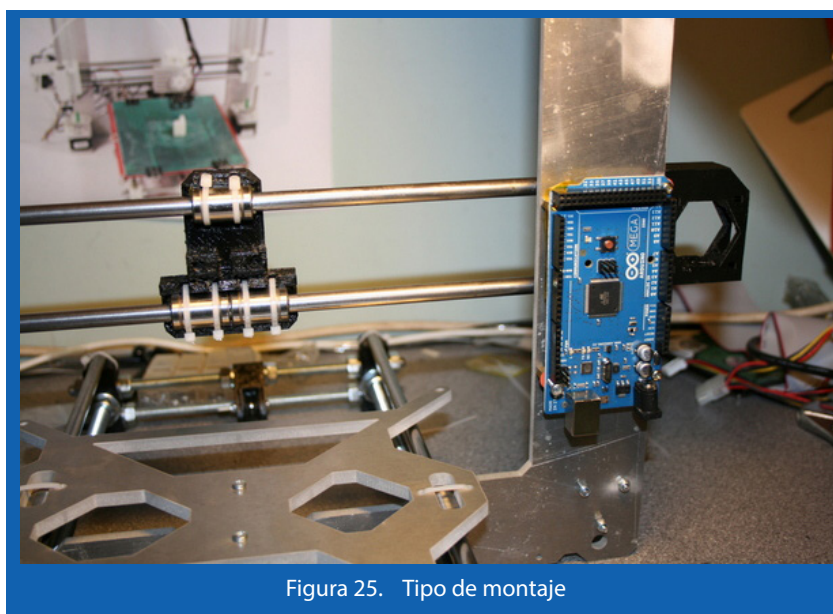


Figura 25. Tipo de montaje



En este trabajo se ha reutilizado la caja de una antigua fuente de alimentación. Para ello se le ha conectado el ventilador a una termoresistencia para que ajuste la potencia de refrigeración según necesidad. La base se ha hecho con metacrilato translúcido y se ha unido mediante tornillos M3-10 mm a la placa *Arduino*.

## 3.5 Precauciones: Posibles errores y soluciones

En este epígrafe se expondrán posibles errores que se pueden dar en la fabricación de la impresora 3D Prusa Medel y sus respectivas soluciones.

### 3.5.1 Conexiones de los motores y finales de carrera

Respecto a las conexiones de los motores, aunque se disponga del esquema de conexiones respecto a la placa electrónica, es posible que el cableado del modelo de motor que utilizado sea de unos colores diferentes. Así pues es necesario tener la seguridad de colocar el bobinado correctamente, es decir, conectar los cables en los conectores de forma adecuada.

Un pequeño error que puede aparecer es que cuando se pruebe el movimiento en alguno de los ejes o del motor del extrusor, estos se muevan en sentido contrario a como se le ordene desde el ordenador. En ese caso, se podría cambiar la configuración en el firmware utilizado, pero es mucho más sencillo quitar el conector de los pines del circuito integrado, girarlo 180° y volver a colocarlo en los mismos pines. Se puede comprobar que el motor ya se mueve en los sentidos indicados por el ordenador.

En cuanto a los finales de carrera, se quiere insistir una vez más en que en caso de escoger la conexión descrita en este documento hay que asegurarse de que los terminales utilizados del final de carrera sean el Común (C) y el de Normalmente Cerrado (NC), como se puede ver en la Figura 26.

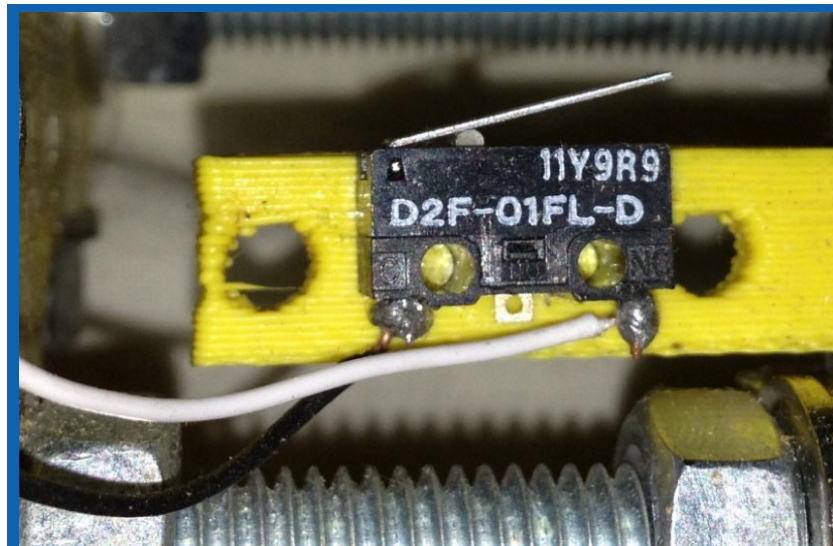


Figura 26. Terminales del final de carrera utilizados

Y se debe conectar en la placa como se muestra en la Figura 27; haciendo las conexiones en los pines que en la placa vienen denominados como *endstop*, siguiendo los impares, tal y como aparece en la siguiente Figura, para que los finales de carrera marquen al software el origen en cada eje.

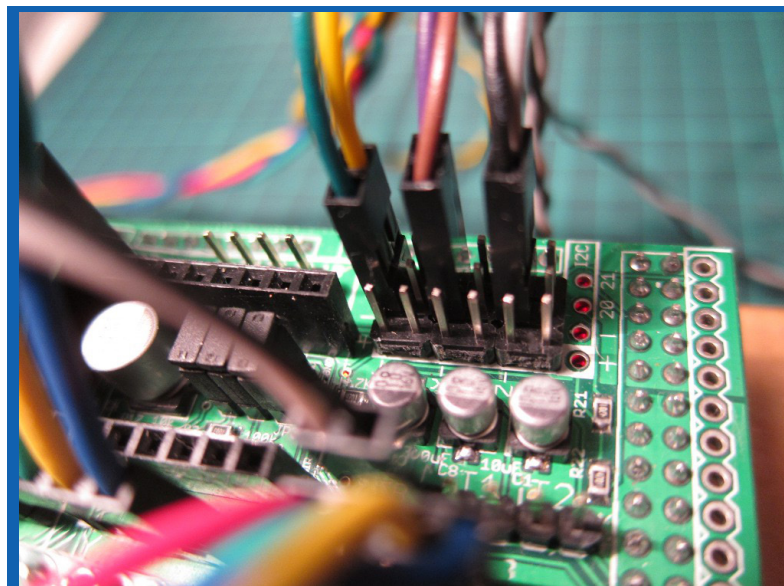


Figura 27. Conexión de los finales de carrera en la placa electrónica

### 3.5.2 Conexión de la fuente de alimentación

Es importante fijarse bien en el esquema de conexiones de la placa utilizada y conectar los terminales positivo (+12 V) y negativo (GND) de la fuente de alimentación en los bornes adecuados, pues aunque algunos dispositivos como el *hot-end* o la *heated bed*, que se calientan por resistencia, o los termistores, no están polarizados, el circuito integrado tiene claramente diferenciados el terminal positivo y negativo, o masa (GND) en este caso; creando graves problemas si la conexión es al revés. Hay que tener muy en cuenta que la fuente de alimentación sea capaz de proporcionar 16 A, ya que, en el mejor de los casos, podría dejar de funcionar.

Una vez instalada la fuente de alimentación es necesario hacer un último ajuste para que funcione. Para ello hay que puentear el cable verde con una de las masas, como aparece en la Figura 28.



Figura 28. Cables puenteados



### 3.5.3 Conexión y regulación de los drivers

Los drivers de los motores, tanto *Pololus* como *Stepstick* se deben conectar también en la posición adecuada. Esta puede variar según la placa electrónica, así pues se debe asegurar que la posición es la correcta. En el caso de utilizar la *Ramps 1.4* se puede orientar de la siguiente manera: posicionar la placa electrónica de manera que la conexión a la fuente de alimentación queda en la parte inferior izquierda, en esa posición los drivers deben tener su potenciómetro en el lado derecho.

Además de la posición para su conexión, es importante regular la corriente a la que se controlan los motores para cada driver. Una corriente excesiva hace que el chip del driver se sobrecaliente y se acabe quemando requiriendo su sustitución.

Para regularlo adecuadamente hay que hacer lo siguiente: teniendo el driver conectado como se aprecia en la Figura 21, se gira el potenciómetro hasta su límite en sentido anti-horario. A continuación se gira poco a poco en sentido horario y se prueba si el motor es capaz de hacer su función. Se debe ajustar en el punto en el que el motor reciba la corriente necesaria para realizar su función correctamente (mover las bases, el carro del eje X, desplazar el eje X a lo largo del eje Z o impulsar el plástico).

Esto se producirá, aproximadamente, al girar un cuarto de vuelta en sentido horario, partiendo del límite mencionado en sentido anti-horario; para un *Pololu A4988*.

Midiendo con una pinza amperimétrica se debe ajustar los *Pololus* de manera que cada motor consuma aproximadamente 250 mA de intensidad a 12 V DC.

### 3.5.4 Conexión de los MOSFET y disipador

El posicionamiento correcto de los transistores de tipo MOSFET en el circuito también es crítico. Un mal posicionamiento puede ocasionar graves problemas. En estas placas el mal posicionamiento más probable sería que se colocase el MOSFET girado 180° respecto a su posición correcta. En ese caso lo que ocurriría sería que el MOSFET se quemaría; e incluso se podría quemar algún otro componente.

La posición del MOSFET viene marcada en la propia placa, con una banda sombreada en lado en el que debe ir el pequeño disipador que el propio MOSFET lleva integrado, como se puede ver en la Figura 29 para una *Ramps 1.4*.

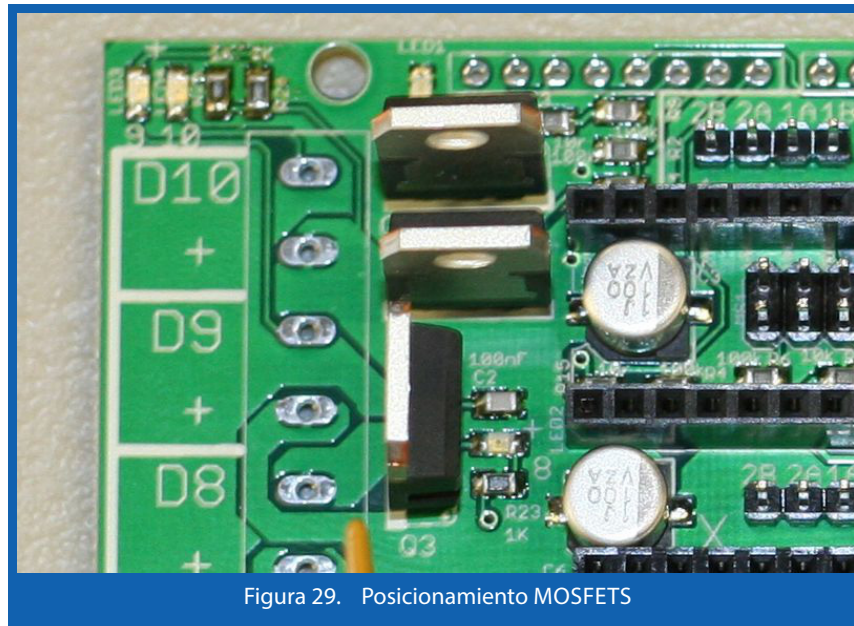


Figura 29. Posicionamiento MOSFETS

Por otro lado, en el MOSFET que va conectado a la clema de la base caliente, *heated bed*, es necesario poner un disipador adicional pues debe conducir mucha intensidad y si no se coloca el disipador con total seguridad el MOSFET se acaba quemando. Las dimensiones de este disipador no es necesario que sean grandes, con uno como el visible en la Figura 30 valdría, ya que según su autor lleva más de 200 horas de impresión y el MOSFET ha aguantado estando, en ocasiones, hasta 7 u 8 horas seguidas imprimiendo con la base a 120 °C.

Figura 30. Disipador del MOSFET conectado a la clema de alimentación para la *heated bed*





### 3.5.5 Vibración

Es necesario ser precavido y tener en cuenta que la vibración producida en el funcionamiento de la impresora puede ocasionar que las tuercas de las bases, los tornillos que sujetan las varillas lisas del eje X bajos las piezas "*Lateral con motor*" y "*Lateral sin motor*", etc. se desatornillen o se aflojen y acaben por caerse y extraviarse, dejando elementos sueltos, etc. Por ello se debe, siempre que sea posible, poner una tuerca más, a modo de "contratuerca", y apretar periódicamente estas tuercas y/o tornillos que puedan soltarse.

### 3.5.6 Tensión de las correas dentadas

Se deben ajustar fuertemente las correas dentadas, tanto del eje X como del eje Y, de modo que queden bien tensas. Es posible que para el tensado correcto sea necesaria la ayuda de otra persona, pues no hay que tensar tanto que se rompan, pero, insisto, es importante que queden bien tensas.

Una baja tensión en las correas puede producir *backlash*, esto es que, cuando el sentido de movimiento del eje (X o Y) cambia, se necesitan ordenar una determinada cantidad de milímetros de movimiento en ese sentido contrario para que ese eje comience realmente a moverse en ese nuevo sentido. Esto ocurre porque los dientes de las poleas, especialmente si son de plástico, no son perfectos y, sobre todo si la correa dentada no está bien tensada, tardan unos milímetros en engancharse con el siguiente diente.

Si las poleas utilizadas son metálicas se reducirá enormemente este efecto; apesar de ésto, la tensión en las correas seguirá siendo importante, pero no será tan crítica.



# CAPÍTULO 4. PUESTA A PUNTO DE LA IMPRESORA

## 4.1 Introducción

En este apartado se mostrará cómo configurar el firmware de la placa *Arduino* así como el software *CURA* y a calibrar los finales de carrera y la orientación de la *heated-bed*.

También se detalla información sobre la vida útil, las piezas más débiles y algunos consejos que pueden ser de gran importancia, así como se explican las modificaciones y mejoras más llamativas e innovadoras desarrolladas durante la implementación de esta impresora.

## 4.2 Configuración software

Una de las tareas iniciales consiste en configurar el software para que la comunicación con los drivers de la impresora permita calibrar el hardware con facilidad, además de no forzar los motores paso a paso.

### 4.2.1 Configuración firmware Marlin

Se entra en el programa *Arduino* y el archivo .dte de Marlin. Posicionarse en la pestaña *configuration.h*, que es donde se configuran los parámetros de la impresora.

Primero se debe seleccionar la velocidad de comunicación (ver Listado 1). Es muy importante que esta velocidad concuerde con lo que se especifique en el software de control (*CURA*, en este PFC). Es recomendable el trabajo a 115200 baudios, las placas de trabajo normal no admiten 250000 y se encontrarán problemas.

```
//#define BAUDRATE 250000  
#define BAUDRATE 115200
```

Listado 1. Velocidad de comunicación



Hay que seleccionar el tipo de placa que se tiene (ver Listado 2), en este PFC *Ramps 1.4* (se pueden usar dos configuraciones distintas para los MOSFET de salida)

////The following define selects which electronics board you have. Please choose the one that matches your setup

// 10 = Gen7 custom (Alfons3 Version) "[https://github.com/Alfons3/Generation\\_7\\_Electronics](https://github.com/Alfons3/Generation_7_Electronics)"

// 11 = Gen7 v1.1, v1.2 = 11

// 12 = Gen7 v1.3

// 13 = Gen7 v1.4

// 3 = MEGA/RAMPS up to 1.2 = 3

// 33 = RAMPS 1.3 / 1.4 (Power outputs: Extruder, Bed, Fan)

// 34 = RAMPS 1.3 / 1.4 (Power outputs: Extruder0, Extruder1, Bed)

// 4 = Duemilanove w/ ATMega328P pin assignment

// 5 = Gen6

// 51 = Gen6 deluxe

// 6 = Sanguinololu < 1.2

// 62 = Sanguinololu 1.2 and above

// 63 = Melzi

// 64 = STB V1.1

// 7 = Ultimaker

// 71 = Ultimaker (Older electronics. Pre 1.5.4. This is rare)

// 8 = Teensylu

// 80 = Rumba

// 81 = Printrboard (AT90USB1286)

// 82 = Brainwave (AT90USB646)

// 9 = Gen3+

// 70 = Megatronics

// 90 = Alpha OMCA board

// 91 = Final OMCA board

// 301 = Rambo

#ifndef MOTHERBOARD

#define MOTHERBOARD 34

#endif

Listado 2. Tipo de placa

Luego se define el tipo de termistor que se tiene montado (ver Listado 3), en este PFC Honeywell para el extrusor y un termistor de 100k para la cama.

//=====Thermal Settings

//--NORMAL IS 4.7kohm PULLUP!-- 1kohm pullup can be used on hotend sensor, using correct resistor and table

Listado 3. Tipo de termistor



```
//// Temperature sensor settings:
// -2 is thermocouple with MAX6675 (only for sensor 0)
// -1 is thermocouple with AD595
// 0 is not used
// 1 is 100k thermistor - best choice for EPCOS 100k (4.7k pullup)
// 2 is 200k thermistor - ATC Semitec 204GT-2 (4.7k pullup)
// 3 is mendel-parts thermistor (4.7k pullup)
// 4 is 10k thermistor !! do not use it for a hotend. It gives bad resolution at high
temp. !!
// 5 is 100K thermistor - ATC Semitec 104GT-2 (Used in ParCan) (4.7k pullup)
// 6 is 100k EPCOS - Not as accurate as table 1 (created using a fluke thermocouple)
(4.7k pullup)
// 7 is 100k Honeywell thermistor 135-104LAG-J01 (4.7k pullup)
// 8 is 100k 0603 SMD Vishay NTC50603E3104FXT (4.7k pullup)
// 9 is 100k GE Sensing AL03006-58.2K-97-G1 (4.7k pullup)
// 10 is 100k RS thermistor 198-961 (4.7k pullup)
//
// 1k ohm pullup tables - This is not normal, you would have to have changed out
your 4.7k for 1k
// (but gives greater accuracy and more stable PID)
// 51 is 100k thermistor - EPCOS (1k pullup)
// 52 is 200k thermistor - ATC Semitec 204GT-2 (1k pullup)
// 55 is 100k thermistor - ATC Semitec 104GT-2 (Used in ParCan) (1k pullup)

#define TEMP_SENSOR_0 7
#define TEMP_SENSOR_1 0
#define TEMP_SENSOR_2 0
#define TEMP_SENSOR_BED 1
```

Listado 3. Tipo de termistor

Seguidamente se configura la polaridad de los finales de carrera (Listado 4):

```
// The pullups are needed if you directly connect a mechanical endswitch between
the signal and ground pins.
const bool X_ENDSTOPS_INVERTING = true; // set to true to invert the logic of the
endstops.
const bool Y_ENDSTOPS_INVERTING = true; // set to true to invert the logic of the
endstops.
const bool Z_ENDSTOPS_INVERTING = true; // set to true to invert the logic of the
endstops.
```

Listado 4. Polaridad finales de carrera

Luego se define el sentido de giro de los motores (ver Listado 5). También se puede hacer dando la vuelta al cable de ese motor, poniendo la bobina 1 como la dos y viceversa.

```
#define INVERT_X_DIR true // for Mendel set to false, for Orca set to true
#define INVERT_Y_DIR true // for Mendel set to true, for Orca set to false
#define INVERT_Z_DIR true // for Mendel set to false, for Orca set to true
#define INVERT_E0_DIR false // for direct drive extruder v9 set to true, for geared
extruder set to false
#define INVERT_E1_DIR false // for direct drive extruder v9 set to true, for geared
extruder set to false
#define INVERT_E2_DIR false // for direct drive extruder v9 set to true, for geared
extruder set to false
```

Listado 5. Sentido de giro

Y por último se configuran los pasos por vuelta de cada eje para desplazarse 1 mm, las aceleraciones y las velocidades máximas (ver Listado 6).

El cálculo del eje Z, por ejemplo, se hace sabiendo que un paso de rosca M5 es de 0.8 mm y que los pasos del motor en cada giro son 200 (1,8° por paso), multiplicándolo por 16 que es la resolución que se configuró en el hardware:  $0,8 \times 200 \times 16 = 2560$ .

```
//// MOVEMENT SETTINGS
#define NUM_AXIS 4 // The axis order in all axis related arrays is X, Y, Z, E
#define HOMING_FEEDRATE {25*60, 25*60, 2*60, 0} // set the homing speeds (mm/
min)

// default settings

#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {80, 80, 2560, 800} // default steps per
unit for ultimaker
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {400, 400, 1, 45} // (mm/sec)
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {500,500,50,500} // X, Y, Z, E maximum
start speed for accelerated moves. E default values are good for skeinforge 40+, for
older versions raise them a lot.

#define DEFAULT_ACCELERATION 1000 // X, Y, Z and E max acceleration in mm/
s^2 for printing moves
#define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 2000 // X, Y, Z and E max acceleration
in mm/s^2 for r retracts
```

Listado 6. Paso por vuelta

Ir a Herramientas->Tarjeta y seleccionar *Arduino MEGA2560* y luego en Herramientas->Puerto Serial seleccionar el puerto COM que haya montado el ordenador. Luego cargar y tras un par de minutos se tiene el firmware cargado en la placa y listo para usar.



### 4.2.2 Configuración software CURA

Es importante que los datos coincidan entre el firmware y el software de control. “Steps per E” indica el número de pasos del extrusor, anteriormente se ha configurado 800 para el extrusor tipo *Wade*, puede variar dependiendo del modelo utilizado.

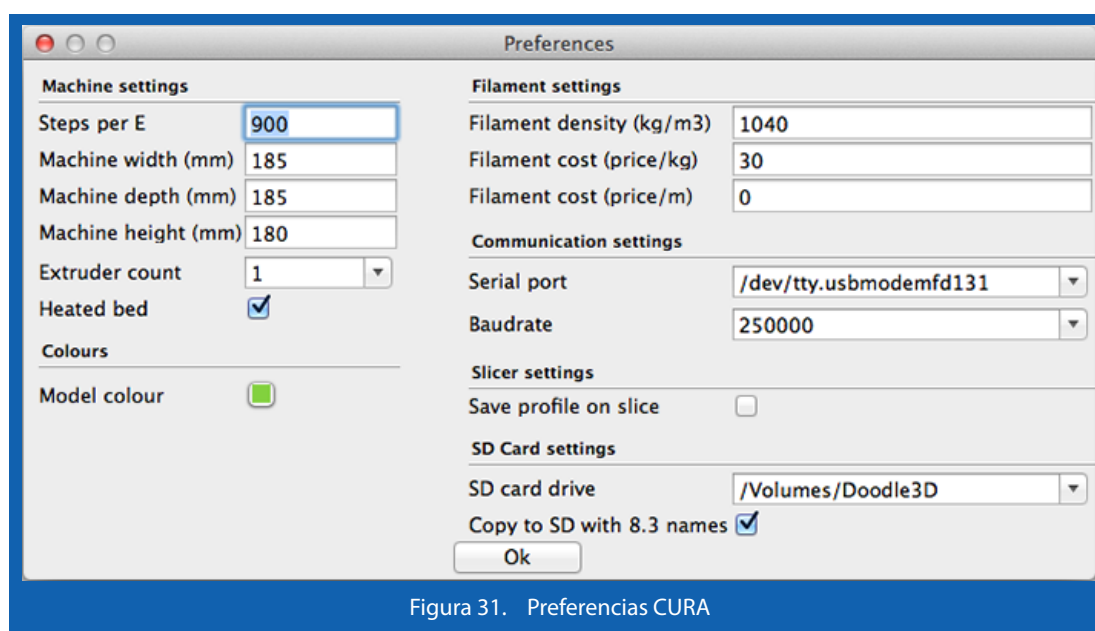


Figura 31. Preferencias CURA

El tamaño de la máquina, en milímetros, puede ser modificado según se desee ajustar más o menos al tamaño del espejo o si se ha fabricado una estructura mayor sobre la que imprimir.

Lo siguiente importante es el *Baudrate*, debe estar igual que el firmware o no funcionará, en este caso 115200 por un correcto funcionamiento de esta impresora..

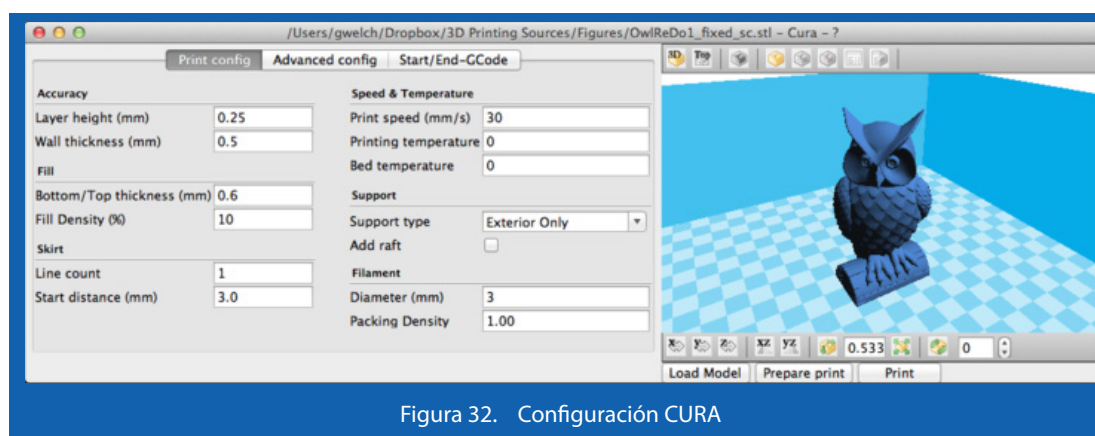


Figura 32. Configuración CURA

En configuración de impresión, modificar el diámetro y la densidad del material, siendo 0,85 para ABS y 1,00 para PLA.

En configuración avanzada, ajustar el tamaño del *Nozzle* (punta del *hot-end*), en este PFC es 0,35, y las velocidades a las que se moverán los ejes.

En la configuración experta se puede modificar la anchura de las paredes, el uso del método *Joris* para evitar saltos en el eje Z, el porcentaje de relleno e, incluso, el orden de la secuencia de impresión. Estos ajustes serán personales y no será necesario para las primeras impresiones o hasta que se tenga un mayor conocimiento del funcionamiento de estas máquinas.

## 4.3 Calibración hardware

Una vez esté la máquina bien configurada será el momento de calibrar los finales de carrera y la *heated-bed*. Para ello se preparará cualquier impresión con “*Prepare Print*” y se hará *click* en *Print*. En la nueva ventana abierta se pulsará la pestaña *Jog* y, si todo está correcto, se podrán mover los motores a libertad (exceptuando los del extrusor, que necesitan la *hot-end* caliente para poder funcionar).

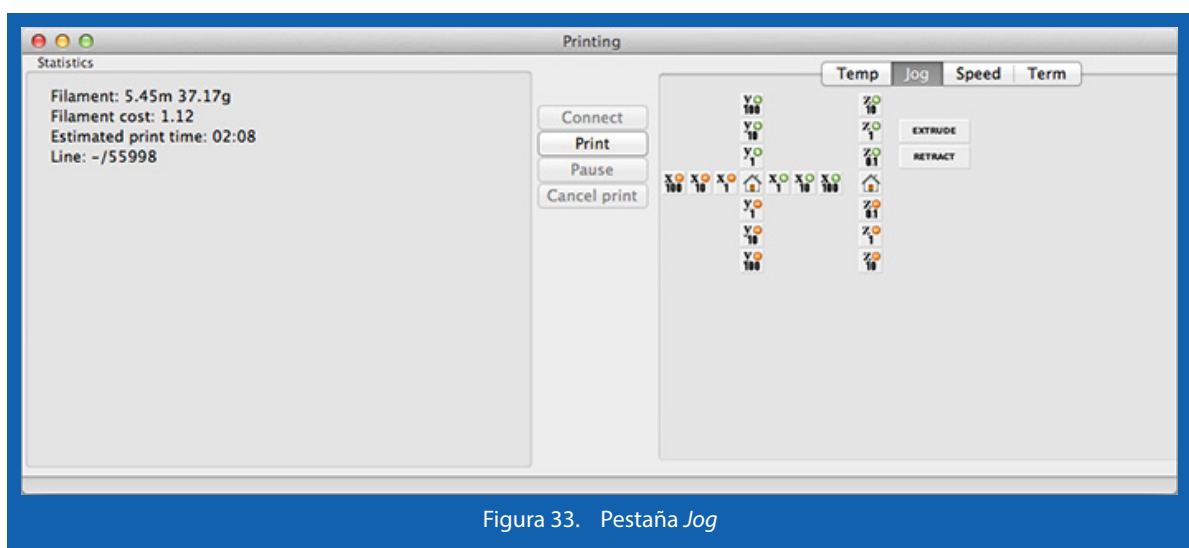


Figura 33. Pestaña *Jog*



### 4.3.1 Calibración finales de carrera

Primero se colocan los finales de carrera dejando cierto margen para evitar que toquen las piezas y se fuercen los motores. Dándole al botón "*homing*" del plano X-Y se hará que vaya hasta el punto (0,0). En este plano hay más libertad y no es necesario ser tan preciso, ya que normalmente no se imprime utilizando los márgenes. En todo caso, para ajustarlos, hay que mover los finales de carrera poco a poco volviendo a darle al botón "*homing*" cada vez.

El botón "*homing*" le marca a la impresora el punto 0, así que no se pueden mover los motores en sentido negativo más allá de ese punto.

Para ajustar el eje Z hay que tener mucho más cuidado, ya que se corre el riesgo de romper la punta del *hot-end*, la *heated-bed* o de forzar los motores. En primer lugar comprobar que la *heated-bed* tiene libertad de movimiento con los muelles para que, en caso de necesidad, pueda bascular sin problemas. En caso de que no pueda moverse suele ser debido a que los tornillos que la unen a la estructura no están totalmente verticales, así que hay que aflojar las tuercas y buscar la posición correcta antes de volver a apretarlas.

Ahora se utilizará el mismo método que en el plano X-Y, se dejará un margen suficiente y, a base de "*homing*", se bajará el final de carrera hasta que entre la *heated-bed* y la punta del *hot-end* no quepa más que un folio.

### 4.3.2 Calibración heated-bed

Una vez se tienen los finales de carrera calibrados es hora de comprobar la perpendicularidad de la cama respecto al extrusor. En este apartado se explica el método más sencillo y eficaz que se ha comprobado.

Sin salir de la pestaña "*Jog*" en CURA, se utilizarán los botones de control. Empezar con los motores en posición (0,0,0) e ir moviendo el extrusor a lo largo del plano X-Y, llevándolo de esquina a esquina, comprobando que en todo momento el hueco entre la cama y el *nozzle* permite que un folio se mueva sin resistencia pero sin espacio para bailar.

Llevando el extrusor a las cuatro esquinas y ajustando la cama mediante la tuerca y contratuerca se podrá decir que la cama está perfectamente ajustada y se podrá empezar a imprimir sin problemas.

## 4.4 Vida útil, piezas delicadas y consejos de uso

En este apartado se da una serie de información con la finalidad de que el lector conozca detalles de la vida útil de la máquina en general, que tenga en cuenta cuáles son las piezas con las que más cuidado debe tener y dar algunos consejos de uso que pueden ser de gran importancia.

### 4.4.1 Vida útil

Durante su uso no se han hayado problemas en las piezas de plástico que forman la impresora, la electrónica, etc., salvo por el MOSFET que da servicio a la *heated bed*, que se quemó al probar la impresora antes de que el disipador fuera puesto.

Con la refrigeración y el mantenimiento adecuado, la vida útil es indefinida. El *hot-end Budaschnozzle 2.0* ha mejorado notablemente sobre sus versiones anteriores, incluyendo el disipador, la base, el termistor y la punta de serie y con materiales de calidad.

### 4.4.2 Piezas delicadas

Hay piezas, como los engranajes del extrusor o las poleas, que son piezas críticas que a varios usuarios les han dado problemas, ya sea por *backlash*, en el caso de las poleas; o, por llegar a destruirse en mitad de una impresión, tanto por parte de las poleas como por parte de los engranajes comentados. Es por eso que se recomienda al lector que una vez tenga montada y calibrada su impresora 3D, lo primero que haga sea imprimirse un repuesto tanto de las dos poleas como de los engranajes.

Por último, insistir una vez más en la necesidad de añadir un disipador en los MOSFET conectados a los bornes de la *heated-bed* y a los *hot-ends*, de no ser así es seguro que el de la *heated-bed* se quemará y puede producir problemas mayores.



### 4.4.3 Consejos de uso

Como consejo de uso es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones, las cuales ahorrarán problemas al imprimir piezas:

- ➔ No se debe extruir, ni manualmente ni como velocidad de impresión, a más de 90 mm/min, pues los dientes de los engranajes del extrusor sufrirían mucho y, por otro lado, las estrías del *hobbed bolt* podrían provocar un “mordisco” en el filamento de plástico, es decir, desgastar un pedazo tan grande del mismo que no llegue a poder seguir tirando de él y, por tanto, deslice, dejando de extruir plástico.
- ➔ Hay que esperar a que tanto la *heated-bed* como el *hot-end* alcancen las temperaturas de trabajo, 110/120 °C y 220/230 °C, respectivamente, para plástico ABS y 70/80 °C y 170/180 °C para plástico PLA. Si el *hot-end* no ha llegado a su temperatura de trabajo se puede provocar un intento de extrusión en frío, que estropee tanto el *hot-end* como el extrusor. Por otro lado, si es la *heated-bed* la que no ha alcanzado la temperatura de trabajo, el plástico no se adhiere a ella como es debido y, por tanto, se estropeará la pieza en construcción. El software CURA hace esto de forma automática.
- ➔ El final de carrera del eje Z se debe posicionar de manera que, cuando hagamos “*homming*” en ese eje (es decir cuando se mande buscar el origen del eje), la punta del *hot-end* quede pegada a la base. De esa manera será más fácil calibrar la altura a la que se imprime la primera capa de las piezas, la cual es crítica ya que, si es muy baja, se puede dañar la *heated-bed* o dañar u obstruir el *hot-end* y, si es muy alta, el plástico no se pegará bien a la base y, por tanto, la pieza no se imprimirá bien.
- ➔ Se debe bajar la temperatura de la *heated bed* antes de retirar las piezas impresas, de lo contrario, especialmente las piezas de gran tamaño, estarán demasiado pegadas y, si se aplica demasiada fuerza para quitarlas, se dañará tanto la propia pieza como cualquier elemento de la base de la impresora.
- ➔ No es aconsejable usar herramientas punzantes para despegar las piezas, pues se puede dañar el Kapton y la superficie que haya debajo de éste; que en caso de ser la *heated bed* (porque no se use espejo o cristal) se puede dañar su circuito impreso, quedando la *heated bed* inutilizable y requiriendo entonces su sustitución por otra *heated bed* nueva.



## 4.5 Innovaciones implementadas

En este apartado se describen algunas de las mejoras y modificaciones realizadas. El trabajo se ha centrado principalmente en la adecuación de la impresora para permitir un uso continuado sin riesgo de sobrecalentamiento o de desajuste debido a las vibraciones provocadas durante la impresión.

### 4.5.1 Cajetín electrónico

Como se puede observar en la Figura 34, se han realizado varias mejoras dignas de mención:

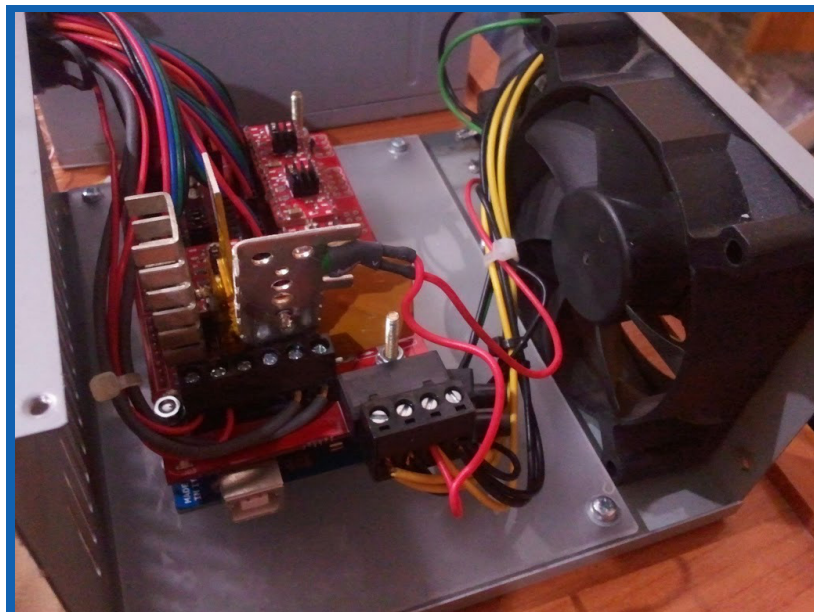


Figura 34. Cajetín electrónico y disipadores

- Mejora en la disipación de los componentes: Tanto en los chips de los Pololus (drivers de los motores) como en los MOSFETs se han añadido disipadores fijados con pasta térmica y atornillados, respectivamente, que resultan absolutamente necesarios para conseguir alargar el tiempo de funcionamiento e, incluso, para imprimir grandes piezas sin peligro de averías debido a la fusión de los transistores de efecto campo.



- **Mejora en la eficiencia de ventilación:** Se ha colocado un termistor NTC al MOSFET de control de la *heated bed* que, conectado a un ventilador de 60 mm, controla la velocidad de giro del mismo. De esta manera el ventilador no consumirá más energía que la necesaria, manteniendo la temperatura de trabajo estable al sacar el aire caliente de la placa al exterior. Se recomienda este sentido de flujo para evitar repartir el calor de los MOSFETs entre los demás componentes de la placa.
- **Mejora del flujo y de la protección:** Se ha adaptado la caja de una fuente de alimentación para acoger la electrónica y mantenerla a salvo de posibles accidentes. Además se ha mejorado el flujo de aire al conseguir que la circulación pase directamente por los componentes, enfriándolos hasta los niveles de trabajo comunes. Esto se ha conseguido al construir una base de metacrilato que fija y separa la placa de la superficie metálica, evitando así que haya falsos contactos y aumentando drásticamente su protección ante caídas. A este cajetín se le han realizado diversas aperturas para facilitar la conexión USB desde el exterior además de proporcionarle un aspecto cuidado y ordenado al cableado que conecta la electrónica.

### 4.5.2 Heated Bed estabilizado

En el segundo apartado del capítulo 3.3.2.1 de este PFC se explica un paso de montaje que era, en sí, una mejora sobre la base original: la protección frente a vibraciones de la sujeción de la *heated bed* a la estructura.

La gran cantidad de movimientos que debe realizar la cama a lo largo de una impresión da lugar a una vibración casi constante que conlleva la pérdida de firmeza estructural, así como al desajuste de la calibración a la que ha sido sometida anteriormente. Para evitar estos problemas se ha mejorado la resistencia modificando la posición de las guías y añadiéndole tuerca y contratuerca para evitar la afección de las vibraciones. Esta nueva posición no modifica la libertad de movimiento con la que cuenta la *heated bed* gracias a los muelles mas, sin embargo, alarga con creces el tiempo necesario entre calibraciones además de mejorar la fiabilidad de la impresión.

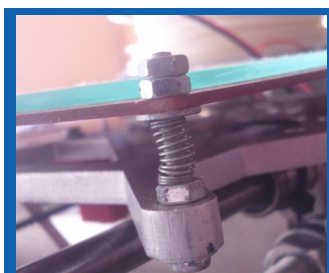


Figura 35. Montaje estabilizador



# CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

## 5.1 Conclusiones

Durante el desarrollo de este proyecto se ha implementado una máquina de prototipado rápido autoreplicable modelo Prusa Mendel iteración 3.

Para conseguir este objetivo se han analizado los diferentes modelos de impresoras 3D, comerciales y Open Source que hay en el mercado, así como se ha estudiado la evolución de los proyectos nacionales e internacionales que abordan el concepto de máquinas autoreplicables.

Se han analizado los diferentes componentes que la completan, imprimibles y no imprimibles, enumerándolos y detallando aquellas piezas que permiten modificaciones como el modelo de extrusor.

Se ha expuesto una guía paso a paso de montaje, facilitando la posibilidad de clonación de esta máquina o de futuras versiones, así como se han desarrollado innovaciones que mejoran el funcionamiento de la misma.

Se ha descrito información sobre el mantenimiento y fiabilidad dando instrucciones sobre cómo alargar su vida útil, además de haber dado consejos sobre las precauciones a tomar antes, durante y después de cada impresión.

Se han realizado las mejoras descritas en el apartado “Innovaciones implementadas”, que alargan los tiempos de funcionamiento en impresión continua, protege la electrónica de perturbaciones exteriores y estabilizan la heated bed de las vibraciones normales producidas por el uso.

Se ha analizado el software, elegido aquellos controladores con mejores resultados y detallado información sobre la configuración de los mismos.

Se ha mostrado una guía de calibración, mostrando el método más efectivo a la vez que sencillo, redactando los pasos necesarios para una primera impresión que satisfaga los requisitos necesarios de calidad de un primer prototipo.

## 5.2 Trabajos futuros

Partiendo de la realización de este proyecto, se proponen las siguientes mejoras:

Implementar pantalla LCD y lector de tarjetas SD a la electrónica: esto permite el funcionamiento autónomo de la máquina, evita los posibles errores de comunicación USB y permite mantener el control de la impresión.

Implementar un segundo extrusor. La RAMPS 1.4 de este PFC está preparada, gracias a los disipadores colocados a los MOSFETS y al flujo de refrigeración desarrollado, para la inclusión de un segundo extrusor. Esto le permitiría imprimir en distintos colores e, incluso, con distintos materiales.

Imprimir las piezas necesarias para crear una segunda Prusa Mendel. Además de mantener vivo el legado del proyecto Clone Wars es un reto el hecho de construir una Prusa Mendel it3 escalada. A lo largo de este PFC se han descrito las piezas paramétricas necesarias para conseguir este objetivo, como las varillas o la heated bed.

Por último, mantener actualizada la información residente en los distintos repositorios, pendiente de nuevas innovaciones o mejoras que se desarrollen a nivel mundial. Las impresoras Open Source son un proyecto global en continuo crecimiento, la sincronización con el resto de desarrolladores es de suma importancia para mantener actualizada ésta y cualquier otra impresora 3D que se implemente a partir de sus impresiones.

# BIBLIOGRAFÍA

## Referencias:

- [1] Página web de Thingiverse: <http://www.thingiverse.com/>
- [2] Página web de la impresora 3D modelo Printrbot: <http://printrbot.com/>
- [3] Página web del Proyecto RepRap: [http://RepRap.org/wiki/Main\\_Page](http://RepRap.org/wiki/Main_Page)
- [4] Página web del Proyecto Clone Wars, dentro de la web de la Asociación de Robótica de la Uc3m: [http://asrob.uc3m.es/index.php/Proyecto:\\_Clone\\_wars](http://asrob.uc3m.es/index.php/Proyecto:_Clone_wars)
- [5] Página web del árbol genealógico del Proyecto Clone Wars:  
<http://RepRap.org/wiki/File:2012-12-20-clone-wars-genealogy-100-clones.png>
- [6] Piezas de enganche del eje Z: [http:// www.thingiverse.com/thing:81478](http://www.thingiverse.com/thing:81478)
- [7] Enlace compra Hot-End Budaschnozzle 2.0 en Cooking-Hacks: <http://www.cooking-hacks.com/budaschnozzle-extruder>
- [8] Instrucciones soldadura Ramps 1.4 paso a paso: [http://RepRap.org/wiki/RAMPS\\_1.4/es](http://RepRap.org/wiki/RAMPS_1.4/es)
- [9] Página web de los circuitos integrados Ramps del proyecto RepRap: <http://RepRap.org/wiki/RAMPS>

## Bibliografía básica:

Instrumentación Electrónica. Miguel A. Pérez García. Ed. Thomson

Circuitos Electrónicos. Análisis Simulación y Diseño. Norbert R. Malik. Ed. Prentice Hall

Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry. Jeremy Blum. Ed. Wiley





**industriales**  
etsii UPCT